

MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL SECADO DE ALIMENTOS POR EL MÉTODO
DE VENTANA DE REFRACTANCIA

MONICA JIMENA ORTIZ JEREZ

Universidad del Valle
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería de Alimentos
Doctorado en Ingeniería
Cali, Valle del Cauca
2014

MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL SECADO DE ALIMENTOS POR EL MÉTODO
DE VENTANA DE REFRACTANCIA

MONICA JIMENA ORTIZ JEREZ

Trabajo de tesis para optar al título de:
Doctor en Ingeniería, Énfasis en Ingeniería de Alimentos

Directora:
Claudia Isabel Ochoa Martínez Ph. D.

Universidad del Valle
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería de Alimentos
Doctorado en Ingeniería
Cali, Valle del Cauca
2014

Nota de aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Jurado

Cali, 15 de octubre de 2014

A mis amados hijos, Santiago y Tomás,
a mi esposo y compañero de lucha Renán,
a mis padres

AGRADECIMIENTOS

La autora expresa sus más sinceros agradecimientos a:

Dios en su Inmensa Misericordia por permitirme alcanzar mis metas y objetivos.

Mi esposo Renán por su paciencia y confianza en este largo y difícil camino, a mis hijos Santiago y Tomás por sacrificar tiempo de juego y atención, y a mis padres por su apoyo incondicional.

La profesora Claudia Isabel Ochoa por su tiempo, dedicación y compromiso como tutora y guía en el proceso de mi formación doctoral.

La Universidad del Valle, en especial a la Escuela de Ingeniería de Alimentos por la formación dada y la oportunidad de hacer carrera docente.

COLCIENCIAS por su apoyo económico para financiar parte de mi carrera doctoral incluyendo la pasantía internacional.

Mis compañeros y amigos del Posgrado por su amistad, compañía y consejos durante todos estos años.

El profesor Carlos Vélez por sus consejos y aliento.

El profesor Ashim Datta y su Grupo de Investigación en Cornell University por la oportunidad de ser su pasante y su invaluable orientación en temas de modelación.

CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	11
SUMMARY	13
INTRODUCCIÓN	14
1. FUNDAMENTOS ALREDEDOR DEL SECADO POR VENTANA DE REFRACTANCIA (REFRACTANCE WINDOW™)	16
1.1 SECADO DE ALIMENTOS	16
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO RW	16
1.3 APLICACIONES	17
1.4 PRINCIPIO DE OPERACIÓN DEL SECADO RW	19
1.5 BENEFICIOS DE SECAR CON RW	19
1.6 PRINCIPIOS DEL SECADO POR RADIACIÓN INFRARROJA	20
1.7 MODELADO DE TÉCNICAS DE SECADO	24
1.8 RESUMEN DE CAPÍTULO	24
2. ENTENDIENDO EL SECADO POR VENTANA DE REFRACTANCIA	26
2.1 FÍSICA ACTUAL DEL PROCESO RW	26
2.2 INSUFICIENCIAS DEL MÉTODO RW	29
2.2.1 Ausencia de modelos matemáticos	29
2.2.2 Longitudes de onda de absorción del agua respecto a las longitudes de onda de transmisión del Mylar™ en el espectro IR	33
2.2.3 Efecto del espesor del material en la absorptividad del agua	37
2.3 RESUMEN DE CAPÍTULO	38
3. TRANSFERENCIA DE MASA Y CALOR EN EL SECADO RW	40
3.1 EFECTO DE LA CONDUCCIÓN Y LA CONVECCIÓN EN EL SECADO POR VENTANA DE REFRACTANCIA DE TROZOS DE ZAPALLO (<i>Cucurbita maxima</i>)	40
3.1.1 Introducción	40
3.1.2 Zapallo (<i>Cucurbita moschata</i>)	40
3.1.3 Secado de zapallo	42
3.1.4 Materiales y Métodos	44
3.1.5 Resultados y Discusión	47
3.1.5.1 Distribución de temperatura	47
3.1.5.2 Cálculos de calor	54
3.1.5.3 Curvas de humedad	58
3.1.6 Conclusiones	61
3.2 RADIACIÓN GLOBAL EN EL SECADO RW	62
3.2.1 Introducción	62
3.2.2 Materiales y Métodos	63
3.2.3 Resultados y Discusión	65

3.2.4 Conclusiones	68
4. MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL SECADO RW	70
4.1 INTRODUCCIÓN	70
4.2 MODELO PRELIMINAR BASADO EN EL SECADO EN TAMBOR	71
4.2.1 Ecuaciones generales y condiciones de frontera	72
4.2.2 Modelo agrupado	73
4.3 MODELO MATEMÁTICO DEL SISTEMA RW	74
4.3.1 Aproximaciones y cálculos preliminares	74
4.3.1.1 Acerca de la radiación	74
4.3.1.2 Acerca del flux de calor	78
4.3.1.3 Acerca de la geometría	80
4.3.2 Suposiciones del modelo	81
4.3.3 Ecuaciones generales y condiciones de frontera	81
4.3.3.1 Formulación del problema	82
4.3.3.2 Ecuación de transferencia de calor	82
4.3.3.3 Ecuación de transferencia de masa	83
4.3.4 Parámetros y Ecuaciones auxiliares	86
4.3.4.1 Propiedades físicas	86
4.3.4.2 Coeficientes de transferencia	87
4.3.4.3 Relaciones auxiliares	88
4.4 RESUMEN DE CAPITULO	91
5. SIMULACIÓN COMPUTACIONAL Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS	94
5.1 MÉTODO NUMÉRICO Y PAQUETE COMPUTACIONAL	94
5.2 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO	95
5.3 PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN DEL MODELO	97
5.4 RESULTADOS DE SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO	99
5.4.1 Medición de la pérdida de humedad	99
5.4.2 Perfiles experimentales y simulados de humedad	99
5.4.3 Medición de la distribución de temperatura	101
5.4.4 Perfiles experimentales y simulados de temperatura	102
5.4.5 Otros resultados de simulación	106
5.5 VALIDACIÓN COMPLEMENTARIA	107
5.6 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	109
5.7 RESUMEN DE CAPÍTULO	110
6. RESULTADOS	111
7. CONCLUSIONES	114
8. RECOMENDACIONES	116
REFERENCIAS	117

LISTA DE TABLAS

Tabla	pág.
Tabla 3.1. Temperaturas promedio en las zonas superior e inferior de las muestras	50
Tabla 3.2. Valores de propiedades y condiciones usadas para el cálculo de calor en los sistemas de estudio agua, lámina, alimento y aire	56
Tabla 4.1. Transmisividad del Mylar TM en las longitudes de onda de alta absorción del agua calculada con la Ec. (4.11).	77
Tabla 4.2. Resumen del Modelo Matemático	91
Tabla 5.1. Parámetros y condiciones necesarias para el modelo	97

LISTA DE FIGURAS

Figura	pág.
Figura 1.1 Esquema del equipo convencional del secador RW. Adaptado de Nindo et al. (2003a)	17
Figura 1.2 Extinción de la radiación (absorción, reflexión y transmisión)	21
Figura 2.1 Esquema de la transferencia de energía térmica en el secado RW. Adaptado de Nindo et al. (2007).	27
Figura 2.2 Principales bandas de absorción de los componentes de los alimentos respecto a las del agua. Tomado de Sandu (1986).	34
Figura 2.3 Espectro de absorción del Mylar TM (a) rangos bajos y (b) rangos altos. Tomado de Dupont Teijin Films.	35
Figura 2.4 Transmisión total calculada para películas de Mylar TM de diferentes espesores para temperaturas en la fuente radiante entre 0 y 600°C. Tomado de Tsilingiris et al. (2003)	36
Figura 2.5 Transmisión espectral para películas de vinil (VIN), Mylar (MYL) y policarbonato (PLC). Tomado de Tsilingiris et al. (2003)	37
Figura 3.1 Zapallo (<i>Cucurbita moschata</i>)	41
Figura 3.2 Tamaño y forma de los trozos de zapallo usados en los experimentos.	45
Figura 3.3 Esquema del secador RW	46
Figura 3.4 Montaje del experimento para secado RW (con lámina de Mylar TM)	47
Figura 3.5 Perfiles de temperatura en tres posiciones del espesor de la muestra (inferior, medio y superior) para los cuatro tratamientos (a) NC-MY, (b) NC-MY/AL, (c) FC-MY y (d) FC-MY/AL	49
Figura 3.6 Perfil de temperatura de la muestra en tres niveles del espesor. (a) inferior, (b) medio y (c) superior	53
Figura 3.7 Diagrama de los flujos de calor del sistema de secado estudiado. Adaptado de Nindo y Tang (2007).	55
Figura 3.8 Curvas para 5 h de secado de los cuatro tratamientos: NC-MY (convección natural- Mylar TM), FC-MY (convección forzada- Mylar TM), NC-MY/AL (convección natural- Mylar TM con papel aluminio) y FC-MY/AL (convección forzada- Mylar TM con papel aluminio)	59
Figura 3.9 Medición de la radiación global de muestras delgadas de zapallo sobre lámina de Mylar	64
Figura 3.10 Curvas de secado RW de rodajas delgadas de zapallo sobre diferentes membranas	65
Figura 3.11 Rodajas de zapallo en diferentes instantes del secado sobre LDPE	66

Figura 3.12 Evolución de flux de calor radiante global durante el secado RW con diferentes láminas de plástico	67
Figura 4.1 Representación del volumen de control para el análisis matemático	71
Figura 4.2 Representación de la radiación durante el secado RW en dos extremos: (a) agua-Mylar TM -aire y (b) agua-Mylar TM -producto húmedo	76
Figura 5.1 Malla construida en COMSOL usada para el modelo del secado RW de una pieza rectangular de zapallo	96
Figura 5.2 Contenido de humedad (bs) experimental y predicho en función del tiempo durante el secado RW de rodajas gruesas de zapallo.	100
Figura 5.3 Fotografías de zapallo en diferentes instantes del tiempo durante el secado RW.	101
Figura 5.4 Perfiles de temperatura experimentales y simulados de rodajas de zapallo en las superficies superior e inferior	103
Figura 5.5 Resultados de temperatura experimentales y de simulación ajustados de rodajas de zapallo en las superficies superior e inferior	105
Figura 5.6 Distribución espacial de temperatura en los primeros 30 min de secado RW de un trozo de zapallo.	106
Figura 5.7 Distribución espacial del contenido de humedad durante 6h de secado RW de un trozo de zapallo.	107
Figura 5.8 Comparación del flux de calor conductivo y radiante durante el secado RW	108
Figura 5.9. Comparación de la distribución de la temperatura con y sin efectos de radiación	109

RESUMEN

El secado por ventana de refractancia (Refractance WindowTM, RW) es una técnica que se ha utilizado durante más de dos décadas, principalmente para deshidratar frutas y verduras en forma de purés, jugos y rodajas. La teoría de este secado indica que todas las formas de transferir calor desde el agua caliente están presentes. El uso de una membrana transparente a la radiación infrarroja (IR) en contacto con el agua crea una "ventana" de transmisión hacia un material húmedo dispuesto sobre la membrana. En consecuencia de esto el material experimenta un secado más rápido a una temperatura relativamente baja en comparación con otros métodos. La comprensión de la física que rodea a este tipo de secado y la contribución de cada forma de transferir calor y masa no se había investigado hasta ahora. La necesidad de modelos matemáticos para representar el comportamiento del sistema RW, es importante para mejorar el uso de esta tecnología y facilitar su automatización. En este trabajo se incluye la comprensión del secado RW, las insuficiencias de la descripción actual de su física, los cálculos de calor alrededor del sistema considerado (rodaja gruesa de un material alimenticio), las mediciones de radiación global durante el proceso, el desarrollo de un modelo matemático de transferencia simultánea de masa y calor para predecir perfiles de humedad y temperatura en el sistema analizado, la simulación numérica utilizando la herramienta computacional COMSOL Multphysics 4.3a y la validación experimental de los variables predichas. El análisis de las formas de transferir calor indicó que la conducción tiene un papel importante durante el proceso de secado RW mientras que la contribución de la radiación es casi insignificante en muestras gruesas y aún en aquellas de bajo espesor. El modelo matemático resultante predice bastante bien los datos experimentales. Hasta el momento, las publicaciones que incluyen la técnica RW se reducen a compararla con otras técnicas en términos de eficiencia energética y atributos de calidad de los productos. Con este trabajo se hace una importante contribución al entendimiento de los fenómenos de transferencia que rigen y gobiernan el secado RW.

Palabras clave: secado, Ventana de Refractancia, radiación, modelo matemático, temperatura, contenido de humedad, COMSOL

SUMMARY

Refractance window drying (Refractance WindowTM, RW) is a technique that has been used for over two decades, mainly for dehydrating fruits and vegetables in the form of puree, juices and slices. Drying theory of this process indicates that all forms of heat transfer from the hot water are present. The use of a transparent membrane to the infrared radiation (IR) in contact with the water creates a "window" for transmission to a wet material promoting fast drying and relatively low temperatures in comparison with other methods. Understanding the physics surrounding this type of drying and the contribution of each form of heat and mass transfer has not been investigated so far. The need for mathematical models to represent the behavior of the RW system is important to improve the use of this technology and facilitate its automation. In this paper several topics were included: drying RW understanding, inadequacies of the current description of its physics, calculations of heat around the considered system (thick slice of a foodstuff), measurements of global radiation during the process, the development of a mathematical model of simultaneous heat and mass transfer to predict temperature and moisture profiles in the analyzed system, the simulation results using the computational package COMSOL 4.3a Multiphysics and the experimental validation of the predicted variables. Form analysis of the heat transfer forms, conduction plays an important role during the RW drying process while the contribution of radiation is very small. The resulting mathematical model predicts the experimental data quite well. So far, publications including the RW technique are reduced in comparison with other techniques in terms of energy efficiency and quality attributes of the products. In this work, an important contribution to the understanding of the governing transfer phenomena in RW drying..

Key words: drying, Refractance WindowTM, radiation, mathematical model, temperature, moisture content, COMSOL

INTRODUCCION

El secado para la preservación de alimentos se ha practicado desde el siglo dieciocho según los primeros reportes publicados. Durante este tiempo, se han desarrollado una amplia gama de técnicas para aplicaciones generales y específicas. Los métodos comerciales de secado han tenido el constante desafío de desarrollar una tecnología que no sólo provea productos de alta calidad sino que opere a una tasa de producción económica. En ese sentido, el secado por ventana de refractancia (Refractance Window, RW) patentado por Magoon (1986) y desarrollado por MCD Technologies Inc. (Tacoma, WA), es un método de deshidratación de alimentos que ofrece bajos costos de operación con una excelente retención de color, sabor y nutrientes. Este secado ha ganado preferencia sobre otras técnicas y se ha utilizado exitosamente para producir un amplio y diverso rango de productos como frutas y vegetales, jugos, mezclas de huevos, extractos herbales, comida de mar, ingredientes dietéticos y nutracéuticos, ingredientes para alimentos tales como hierbas, especias y vegetales y suplementos nutricionales, entre otros.

Se dice que la eficacia del secado RW radica en que el calor se aprovecha desde el agua porque transfiere de tres formas (convección, conducción y radiación) pero sin que el aporte de dichas formas de transferencia haya sido estudiado fenomenológicamente. La energía térmica del agua se transmite por conducción y radiación al alimento a través de una lámina de polietileno u otro material transparente al infrarrojo mientras está en contacto directo con el agua caliente. Según Bolland (2000), el secreto de esta tecnología para producir alimentos deshidratados de calidad superior es su habilidad para crear una “ventana” que permite el paso de energía infrarroja para el secado a temperaturas relativamente bajas. Otro atributo único es su habilidad de auto regular el secado del material al “cerrarse” la ventana por evaporación de la humedad ya que la banda plástica es pobre conductora de calor, lo que implica que el daño por calor se minimiza (Clarke, 2002).

En la búsqueda de las verdaderas razones del nombre con que se ha denominado esta técnica, de su eficiencia energética y especialmente del aporte de cada forma de transferir calor, se

planteó la hipótesis de que el calor por radiación desde el agua caliente hasta el alimento es mínimo, entonces la transmisión de energía es principalmente por conducción. En este trabajo se exponen los aspectos que se estudiaron para describir apropiadamente el método de secado RW, las insuficiencias actuales de su física y el estudio de la transferencia simultánea de masa y calor mediante el planteamiento de un modelo matemático, su simulación numérica y la respectiva validación experimental empleando paralelepípedos de zapallo como alimento modelo. En resumen, los objetivos planteados en este estudio fue plantear un modelo matemático que describa la transferencia simultánea de masa y calor del secado de alimentos por ventana de refractancia (RW) y determinar las causas de su alta eficiencia térmica.

1. FUNDAMENTOS ALREDEDOR DEL SECADO POR VENTANA DE REFRACTANCIA (REFRACTANCE WINDOW™)

1.1 SECADO DE ALIMENTOS

El secado es uno de los métodos más antiguos para preservar alimentos a través de la reducción del contenido de humedad y la disminución de la actividad de agua hasta niveles seguros, prolongando la vida útil y aumentando su valor agregado. Comparados con productos conservados por otros métodos, los alimentos deshidratados tienen una vida útil casi ilimitada y sustancialmente bajos costos de transporte, manejo y almacenamiento. Secar materiales sensibles al calor como frutas, vegetales y otros ingredientes, usados generalmente como base de preparaciones de alimentos, se convierte en un desafío. Aprovechando esta oportunidad y la gran demanda de los consumidores por alimentos deshidratados de alta calidad, continuamente se hacen esfuerzos por desarrollar métodos de secado innovadores y mejorados (Nindo et al., 2003a).

Basados en su desarrollo histórico, los sistemas de secado pueden categorizarse en primera, segunda, tercera y cuarta generación. Las más recientes tecnologías o “de cuarta generación” representan los últimos avances en esta área del procesamiento de alimentos (Vega-Mercado, 2001). Cada una de estas tecnologías tiene una aplicación específica basada en los atributos finales de calidad de los productos deseados, así como en las características físico-químicas de los materiales crudos que se procesan. En este grupo se encuentra el secado por ventana de refractancia (Refractance Window™) (RW).

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO RW

El secado RW fué desarrollado por MCD Technologies, Inc. (Tacoma, WA) para producir productos secos a partir de productos líquidos y semi-líquidos o en purés. Este método de secado se caracteriza por exponer el producto a temperaturas medias y tiempos cortos de secado. La operación del secado RW (Ver Figura 1) se realiza a presión atmosférica y se

utiliza agua a 90-97°C para transferir el calor hacia el producto a secarse. El producto húmedo es dispuesto sobre la superficie de una película plástica transparente al infrarrojo que flota sobre la superficie del agua caliente. El agua se recircula continuamente y se recalienta para mantener la temperatura (Bolland, 2000).

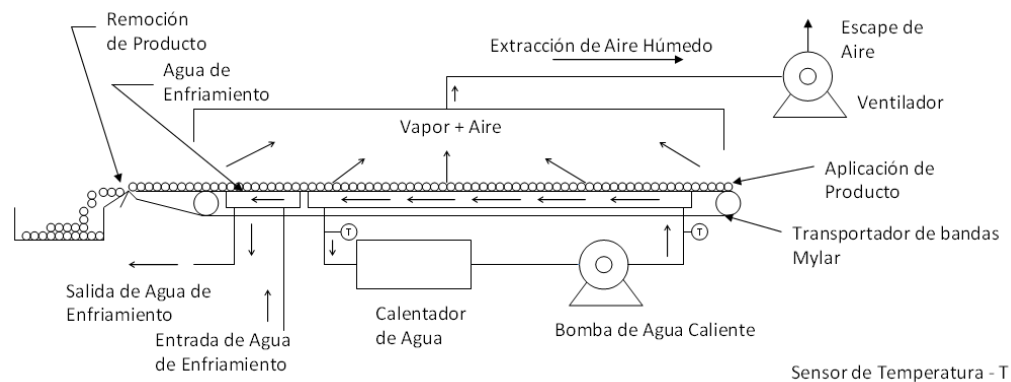


Figura 1.1. Esquema del equipo convencional del secador RW. Adaptado de Nindo et al. (2003a)

1.3 APLICACIONES

Los nuevos métodos de manipulación y procesamiento de alimentos con alto contenido de humedad, se están estudiando constantemente con el fin de mejorar la eficiencia energética y la calidad del producto. El sistema RW es un método de secado reciente para la conversión de productos sensibles al calor, tales como purés, rodajas o jugos de frutas y vegetales en polvos, escamas o láminas con valor agregado. Esta técnica también se aplica en productos farmacéuticos, nutraceuticos, cosméticos, pigmentos y otros bioproductos. Durante el proceso, el material se seca a temperatura moderada y tiempo corto en condiciones continuas o estáticas y a presión atmosférica, dando como resultado productos con atributos de alta calidad tales como color, sabor, aroma, vitaminas y retención de antioxidantes. La calidad del producto es comparable y, en algunos casos, mejor que la obtenida mediante secado por congelación. El proceso se lleva a cabo usando significativamente menos capital y energía.

Entre los estudios se encuentran: carotenoides en zanahorias y, ácido ascórbico y color en fresas (Abonyi et al., 1999); color y actividad antioxidante de espárragos (Nindo et al., 2003b) y de aloe (Nindo et al., 2006); sabor, color, carotenoides, capsaicinoides, Actividad Equivalente de Retinol (RAE) y Unidad de Calor Scoville (SHU) de pimentón (Topuz et al., 2009 y 2011); aromas encapsulados en aceite de naranja (Cadwallader et al., 2010); compuestos antioxidantes (ácido ascórbico, fenoles totales, flavonoides totales y licopeno) de tomates (Abul Fadl y Ghanem, 2011) y de papas coloreadas (Nayak et al. , 2011) y compuestos bioactivos también en papas coloreadas (Kaspar et al., 2012), sólo por mencionar algunos.

También, hay estudios que incluyen la comparación de la eficiencia energética (Abonyi et al, 1999; Nindo et al., 2003a y 2004; Nindo et al., 2006; AbulFadl y Ghanem, 2011), la determinación de la reducción microbiana (bacterias coliformes, *Escherichia coli* y *Listeria innocua*) de calabazas (Nindo et al., 2003a); las propiedades de sorción de humedad tales como densidad aparente, solubilidad (%), la relación de rehidratación y la higroscopicidad de jugo de tomate (Abul Fadl y Ghanem, 2011) y zumo de mango Carabao (Capariño et al., 2012), la actividad de agua de aloe (Nindo et al., 2006); la difusividad efectiva y el encogimiento de rodajas de mango Tommy (Ochoa et al., 2012); las isotermas y termogramas de jugo de açai (Pavan et al., 2012); el análisis de la microestructura de polvo de tomate mediante Micrografías de Barrido Electrónico (SEM) (Capariño et al., 2012) y las mediciones de temperatura de puré de zanahoria (Abonyi et al., 1999 o 2001), puré de calabaza (Nindo et al., 2003a), jugo de arándano (Nindo et al., 2007) y puré de jengibre (Dongfeng et al., 2009).

A nivel local, esta técnica se ha utilizado para investigar cinéticas de secado, características de calidad en producto final y eficiencia térmica mediante el secado de frutas tropicales y verduras como mango Tommy (Quintero, 2009), naranja y guayaba (Cano y Viveros, 2010), aloe vera (Mejía, 2011), pitahaya amarilla (Vallejo, 2010), papaya (Ocoró y Ayala, 2013); zapallo (Gaviria y Robles, 2013), entre otros.

Además, se ha utilizado exitosamente para producir un amplio rango de otros productos como mezclas de huevo, extractos herbales, comida de mar, suplementos nutricionales y dietéticos, e ingredientes para alimentos tales como hierbas y especias (Clarke, 2004; Jones, 2006; Nindo y Tang, 2007).

1.4 PRINCIPIO DE OPERACIÓN DEL SECADO RW

Durante el secado RW los tres mecanismos de transferencia de calor ocurren en el agua: conducción, convección y radiación. Las pérdidas de calor o energía desde el agua hacia los alrededores ocurren por conducción o evaporación con procesos internos de convección y radiación. Si una lámina se pone sobre la superficie de agua entonces la pérdida de energía solo puede tomar lugar por principios de conducción. Sin embargo, si se coloca un material húmedo en la superficie de esta lámina puede ocurrir transferencia radiante. Esto permite que el calor irradiado pase desde el agua hacia el interior del material húmedo. Este se comporta como una “ventana” dispuesta a transferir energía desde el agua hacia el material a ser deshidratado, de esta manera se induce una rápida evaporación de la humedad. En la medida en que el material pierde humedad, dicha “ventana” se va cerrando y la transferencia de calor por radiación disminuye hasta desaparecer. Así el proceso tiene un auto-regulador el cual contribuye a la fijación del sabor y a mantener altos estándares de calidad en los productos (Clarke, 2004).

1.5 BENEFICIOS DE SECAR CON RW

Como se mencionó en la sección 1.3, el secado RW se ha estudiado de varias formas, la mayoría de los estudios hacen comparaciones con otros procesos como el secado por convección natural y forzada, secado por atomización, liofilización, secado en estufa, secado en tambor, secado en bandejas, secado de lecho fluidizado y microondas combinado con secado de lecho fluidizado.

En el procesamiento de frutas y vegetales, un método es particularmente eficiente si la retención de componentes naturales y aspectos de calidad es significativa en los productos secos para estar disponibles en futuras aplicaciones. Muchas de las técnicas tradicionales para deshidratar estos alimentos, particularmente aquellas que usan calor, producen productos con deficiencias en muchos de los aspectos deseados de calidad. Sin embargo, las eficiencias energéticas del secado RW (27.9%-47.6%) son comparables o algo menores que aquellas reportadas para métodos de secado con aire caliente (30-40%); la retención de vitamina C es comparable o mayor que en productos liofilizados hasta un contenido de humedad similar; la retención de carotenos es comparable con productos liofilizados y mejores que con secado en tambor; la degradación del color es comparable o ligeramente menor que en los productos liofilizados (Bolland, 2000). Particularmente, el secado por congelación siempre produce materiales secos de alta calidad pero esta tecnología sufre por sus altos costos de operación y producción relativamente baja (Clarke, 2004).

1.6 PRINCIPIOS DEL SECADO POR RADIACIÓN INFRARROJA

Hace dos décadas, los reportes sobre la aplicación de radiación infrarroja (IR) a productos como alimentos, madera, o arena no eran tan comunes. A mediados de los 90's ya habían reportes sobre secado IR de granos, harina, vegetales, pasta, carne, pescado y demás, mostrando que podía ser exitosamente aplicado en alimentos. Entre otras ventajas se destacaron, la versatilidad del calentamiento IR, la simplicidad del equipo requerido, la fácil adaptación del calentamiento IR al calentamiento convectivo, conductivo y por microondas, la respuesta transiente rápida, y también los ahorros significativos de energía (Ratti y Mujumdar, 1995).

La transmisión de la radiación electromagnética no necesita un medio para su propagación. El espectro de longitud de onda de la radiación depende de la naturaleza y la temperatura de la fuente de calor. Cada cuerpo emite radiación debido a su nivel de temperatura. Esto es llamado radiación térmica porque genera calor que está localizado en el rango de longitud de onda de 0.1-100 μm dentro del espectro. La radiación infrarroja cae en esta categoría.

La radiación térmica incidente sobre un cuerpo puede ser absorbida y su energía convertida en calor, reflejada desde la superficie, o transmitida a través del material, como se muestra en la Figura 1.2.

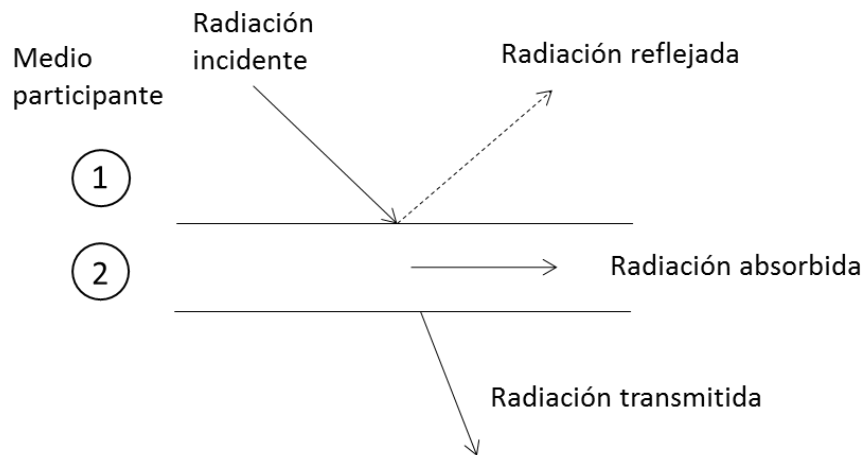


Figura 1.2. Extinción de la radiación (absorción, reflexión y transmisión)

Esta radiación sigue el balance de energía basado en la teoría electromagnética clásica (Incropera y DeWitt, 1999):

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (1.1)$$

donde, ρ es la reflectividad, α es la absorptividad, y τ la transmisividad. Con base en la transmisividad, los materiales pueden clasificarse dependiendo principalmente del estado físico del cuerpo donde la radiación incidió. Un cuerpo que no permite que la radiación sea transmitida a través es llamado opaco y se caracteriza por $\tau = 0$. Ejemplo de estos son la mayoría de los sólidos. La reflexión puede ser "regular" (también llamada especular) o "difusa" dependiendo del acabado de la superficie del material. En el caso regular, el ángulo de incidencia de la radiación es igual al ángulo de reflexión debido a una superficie altamente pulida o una superficie suave. Cuando la superficie tiene rugosidades más grandes que la longitud de onda, la radiación es reflejada de manera difusa en todas las direcciones.

Generalmente, los cuerpos sólidos absorben todo tipo de radiación en una capa muy angosta cerca de la superficie. Esta es una consideración muy importante en el modelamiento de procesos de transferencia de calor, puesto que matemáticamente este concepto transforma un término dentro del balance de energía en una condición de frontera (Ratti y Mujumdar, 1995). Un cuerpo ideal que absorbe toda la energía incidente sin reflejar o transmitir es llamado un cuerpo negro, para el cual $\alpha = 1$. Un cuerpo negro está también definido como uno que emite el máximo de radiación por unidad de área y su poder emisor depende sólo de la temperatura pero no refleja porción alguna.

La ecuación básica para la transferencia de calor por radiación de un cuerpo está dada por:

$$q = A\varepsilon\sigma T^4 \quad (1.2)$$

donde, q es el flujo de calor, A es el área superficial del cuerpo, ε es la emisividad, σ es la constante de Stefan-Boltzman y T es la temperatura del cuerpo negro. La relación entre el poder de emisión de una superficie y el de un cuerpo negro se llama emisividad, ε . Para un cuerpo negro perfecto su emisividad $\varepsilon = 1.0$ y para un cuerpo no negro su emisividad es $\varepsilon < 1.0$. Las sustancias que tienen emisividades inferiores a 1.0 se llaman cuerpos grises cuando la emisividad es independiente de la longitud de onda. Todos los materiales reales tienen emisividades $\varepsilon < 1.0$ (Geankoplis, 2007).

El agua es especialmente importante cuando un material húmedo es expuesto a la radiación. Una alta porción de la radiación puede ser absorbida por las películas finas de agua, hielo, vapores o solución de agua contenidos en capilares, o mediante el vapor emanado en los alrededores del material (Sandu, 1986). La región de longitud de onda para los alimentos puede restringirse al rango infrarrojo de 0.75 a 15 μm .

Las cuatro principales bandas de absorción infrarroja de agua líquida son 3, 4.7, 6 y 15.3 μm . La banda de absorción a 15.3 μm realmente se extiende sobre el rango 10 – 40 μm . La temperatura no tiene un efecto significativo sobre estas bandas de absorción. El agua líquida tiende a absorber totalmente a radiación incluso en espesores pequeños cuando es irradiada con luz monocromática en las principales longitudes de onda de absorción. La posición y la fuerza de las bandas de absorción principales del agua líquida varían ligeramente con la naturaleza de los hidratos y solutos. Estas distorsiones se han usado para comprender mejor la naturaleza de la retención de agua (Sandu, 1986).

El material a ser secado por IR requiere una baja reflectividad para minimizar la potencia requerida para calentarlo y, dependiendo del proceso de secado específico, una absorptividad alta o media. Al secar materiales húmedos como los alimentos es necesario incrementar la transmisividad para evitar un calentamiento extremadamente intensivo y daño térmico de la superficie. Es importante señalar que si la absorptividad de un material es baja, su transmisividad es alta, y viceversa. Estas propiedades dependen de la longitud de onda, el espesor del material y el contenido de agua.

Los alimentos, por ejemplo, son mezclas complejas de moléculas bioquímicas largas y polímeros, sales inorgánicas, y agua y las bandas de absorción de cada uno de estos constituyentes no son las mismas. Generalmente, muchos materiales totalmente húmedos tienen su absorptividad mínima en aquellas longitudes de onda en las cuales el agua tiene su transmisividad máxima, señalando el importante rol que el agua juega en la absorción de la radiación (Ratti y Mujumdar, 1995). En la medida en que el secado procede, el material que se está secando sufre un cambio en sus propiedades de radiación, incrementando su reflectividad y consecuentemente disminuyendo su absorptividad en contenidos bajos de agua. Es posible cambiar adecuadamente la temperatura del emisor para mejorar la absorción de radiación al final del secado (Krishnamurthy et al., 2008).

Claramente, el buen control de la operación IR es esencial para lograr los resultados deseados en términos de la cinética de secado y la calidad del producto, así como también para

garantizar una operación segura. Así que un buen control de retroalimentación es el que permite que la fuente de potencia IR sea interrumpida si se alcanzan temperaturas excesivamente altas en la cámara, lo cual puede llevar al sobrecalentamiento del producto (Chou y Chua, 2001).

1.7 MODELADO DE TÉCNICAS DE SECADO

Existe en la literatura un sinnúmero de investigaciones basadas en modelos teóricos para describir los fenómenos de transporte involucrados en el secado de alimentos. Para la mayoría su objetivo es determinar la influencia de algunas de las variables de operación como el contenido de humedad del material y la temperatura de secado sobre el desempeño del proceso. Esto es posible dependiendo de la formulación del modelo partiendo principalmente de las ecuaciones de variación de masa y energía en estado no-estacionario. Los sistemas de ecuaciones diferenciales parciales (EDP) resultantes se resuelven analíticamente o empleando paquetes computacionales comerciales (Datta y Rakesh, 2010). Los modelos resultantes son generales pero deben ser capaces de predecir el transporte de agua libre y ligada dentro del alimento y el fenómeno de evaporación/condensación, dependiendo de las fuerzas de conducción reales. Una comparación entre las predicciones teóricas y los resultados experimentales muestran una marcada concordancia. Para hacer más acertadas las predicciones, en los modelos suele involucrarse la cinética del secado así como los efectos de encogimiento de los materiales (Aversa et al., 2010).

1.8 RESUMEN DE CAPÍTULO

Aunque el secador RW lleva más de una década haciendo parte del grupo de nuevas e innovadoras tecnologías, se desconocen muchos detalles de su operación. Se cree que la radiación infrarroja es la forma de calor con mejor desempeño en el proceso resultando en características de calidad final y eficiencia energética comparables con las obtenidas en liofilización y secado con aire convectivo. Sin embargo, no se conoce si realmente es la radiación el fenómeno que gobierna el proceso y que actúa como promotor de la rápida y

efectiva evaporación de la humedad. Se requiere entonces ampliar el conocimiento de la física de este promotor seco, lo cual es posible mediante el análisis de la transferencia simultánea de masa y calor. El principal alcance del presente estudio es la formulación de un modelo matemático de un sistema estático de secado RW para alimentos de alrededor 1 cm de espesor usando el paquete computacional de análisis multifísico COMSOL Multiphysics.

2. ENTENDIENDO EL SECADO POR VENTANA DE REFRACTANCIA

La teoría del secado por ventana de refractancia (RW) indica que todas las formas de transferencia de calor desde el agua caliente están presentes. El uso de una membrana transparente a la radiación infrarroja (IR) en algunas longitudes de onda, al ponerse en contacto con el agua crea una "ventana" de transmisión hacia un material húmedo promoviendo un secado más rápido a una temperatura relativamente baja en comparación con otros métodos. La comprensión de la física que rodea a este tipo de secado y la contribución de cada forma de transferencia de calor y masa no se había investigado hasta ahora. La necesidad de modelos matemáticos que representen el comportamiento del sistema RW es importante para promover el uso de esta tecnología y facilitar su automatización. En este capítulo se detallan: la comprensión del secado RW, el análisis actual del principio teórico y las insuficiencias que rodean el método.

2.1 FÍSICA ACTUAL DEL PROCESO RW

El secado por Ventana de Refractancia (RW) fue patentado por Magoon (1986) y desarrollado por MCD Technologies, Inc. (Tacoma, WA). En el sistema de secado RW la energía térmica se transfiere desde el agua caliente a un material húmedo que está sobre una membrana de plástico transparente al infrarrojo. Los productos que incluyen purés, jugos y pequeñas piezas de materiales, se colocan sobre la lámina de plástico que está en contacto directo con el agua caliente (Capariño et al., 2012). La Figura 2.1 muestra el proceso por el cual el calor se transfiere desde el agua caliente al producto. Según Nindo et al. (2006), durante el secado RW, se utilizan los tres modos de transferencia de calor convección, conducción y radiación. De éstas, la radiación es la más rápida, que tendrá lugar a casi la velocidad de la luz (Bolland, 2000). El calor latente de la condensación del vapor en el agua se transfiere por convección a la superficie inferior de la lámina de plástico. Como ésta es muy delgada, se equilibra casi inmediatamente con la temperatura del agua y la energía térmica se transmite a través de ella por conducción y radiación en proporciones que

dependen de la resistencia que proporciona a estos mecanismos de transferencia de calor (Nindo y Tang, 2007).

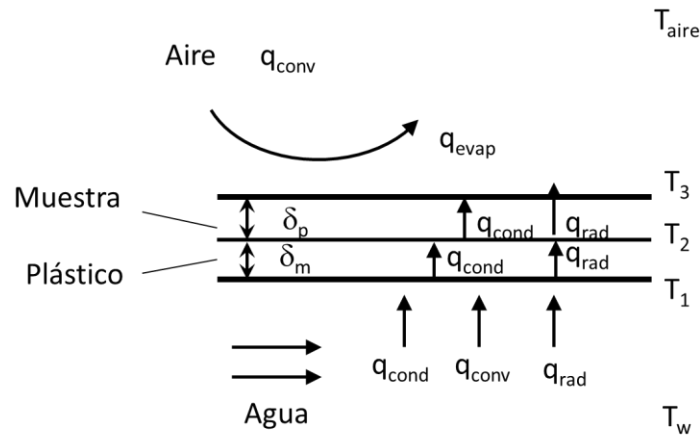


Figura 2.1. Esquema de la transferencia de energía térmica en el secado RW. Adaptado de Nindo et al., 2007

Siempre que el plástico permanezca en contacto con el agua, se minimizan las múltiples reflexiones en la interfaz plástico - material de modo que mucha de la energía térmica se transmite al producto y es absorbida para sí mismo, obligando a la humedad del producto a evaporarse, pero la capacidad de absorción del material está influenciada por su espesor y su contenido de humedad (Ratti y Mujumdar, 1995). Sin embargo, como el material se seca, la "ventana" de infrarrojo se cierra ya que la humedad ya no está en contacto con el plástico, y la única transferencia de calor que tiene lugar es por conducción.

La lámina de plástico llamada MylarTM (DuPont Polyester Film Enterprise, Wilmington, DE) permite la transmisión de energía infrarroja en las longitudes de onda que coinciden con los espectros de absorción de las moléculas de agua en los alimentos (Nindo y Tang., 2007). Esta transmisión es importante porque permite la evaporación rápida a baja temperatura y compensa la baja conductividad térmica del plástico (0.155 W/mK en comparación con 15 W/mK para acero inoxidable). El uso de una lámina de plástico delgada (aproximadamente 0.2 mm) hace que su temperatura se equilibre con facilidad con el agua que fluye por debajo.

La cantidad de energía conducida y radiante varía dependiendo de la resistencia y el espesor de la lámina de plástico que se utiliza. El inventor del secador RW reclama que el uso de un plástico delgado y transparente permite la transferencia eficiente de la radiación de calor en el producto en comparación con uno más grueso. Como el plástico es un mal conductor de calor, se pierde poco calor. Esto también, hace que la mayor parte de la radiación infrarroja se regrese de nuevo al agua, luego la transferencia de calor por conducción llega a ser predominante y la tasa de transferencia de calor hacia el producto se reduce a medida que el producto se seca aún más. Así se protege el producto del sobrecalentamiento previniendo la degradación del color y sabor (Bolland, 2000; Vega-Mercado et al., 2001).

El uso de agua caliente como medio de transferencia de calor y a temperaturas justo por debajo de la ebullición es una característica de diseño que hace único a este método de secado. La rápida circulación del agua de proceso incrementa el coeficiente de transferencia de calor por el lado plástico-agua mientras que un flujo controlado de aire frío sobre el producto elimina el agua evaporada (Nindo y Tang, 2007). El inventor del secador RW reclama que más energía térmica es absorbida por el producto mientras más humedad contenga, lo que facilita la rápida evaporación.

La transferencia de energía térmica desde el alimento al aire es principalmente por convección y por enfriamiento evaporativo del material alimenticio. Esta evaporación de agua desde el producto es muy intensa y constituye una parte importante del consumo de energía en el secado RW. Además esta técnica mantiene las temperaturas del producto muy por debajo de la temperatura del agua de circulación, resultando en una rápida transferencia de masa desde el producto y creando alta saturación en la superficie del alimento que limita la interacción producto-oxígeno y ayuda a mantener la calidad del producto (Vega-Mercado et al., 2001; Nindo et al., 2006).

La mayoría de los productos se pueden secar con temperaturas del agua desde 60 hasta 97°C y la temperatura de los productos rara vez supera los 70°C (Bolland, 2000; Nindo y Tang, 2007). El agua caliente se recicla continuamente y se reutiliza mejorando la eficiencia térmica

del sistema cuando se compara con otros secadores convencionales (Nindo et al., 2006). Puesto que el secado RW es una tecnología relativamente reciente, las publicaciones han informado su efecto sobre las características de calidad de productos secos, pero el análisis de la contribución de cada uno de los modos de transferencia de calor no se ha investigado suficientemente.

2.2 INSUFICIENCIAS DEL MÉTODO RW

2.2.1 Ausencia de modelos matemáticos

En la operación del secador RW, se consideran importantes los aportes por conducción y radiación de la energía térmica del agua pero se desconocen las resistencias que ésta ofrece a cada mecanismo de transferencia. Hasta el momento, no hay un estudio descriptivo de las físicas que representan el sistema RW desde el análisis de la transferencia de masa y calor. Un modelo matemático de este problema podría dar solución al entendimiento del proceso, explorar muchas más aplicaciones y plantear otros alcances gracias a su automatización.

Los modelos descritos a continuación se expresan con la misma nomenclatura que usaron sus autores, y no tiene nada que ver con la nomenclatura que se usó en el modelo objeto de esta investigación y que se presentará más adelante.

❖ Análisis matemático de Ghanem (2010)

Actualmente no hay modelos matemáticos basados en la física, sólo Ghanem (2010) desarrolló un análisis matemático de un secador tipo película o de refractancia, que consiste en una relación dada por el producto coeficiente de secado (K)–tiempo transcurrido (ϕ) y la relación de humedades del material como una función de variables independientes asociadas. Usando el teorema Pi de Buckingham se involucraron nueve cantidades con cinco dimensiones para formar tres grupos adimensionales (π_1 , π_2 y π_3).

$$K\phi = F(\lambda, \nu, q, m_p, C_p, \Delta T, R) \quad (2.1)$$

donde, λ es la longitud característica (m), ν es la tasa de aire por unidad de área superficial (m/s), q es la tasa de calor (kW), m_p es la masa del material que se está secando (kg), C_p es

el calor específico del material (kJ/kg K), ΔT es la diferencia de temperatura entre el fondo y la superficie del material (K) y R es la humedad relativa (adimensional). El parámetro de circulación de aire está representado por π_2 . El análisis dimensional resultó en la siguiente relación para el secador:

$$K\phi = A \left(\frac{\lambda}{v\phi} \right)^C \quad (2.2)$$

donde, A y C son funciones de π_3 , respectivamente:

$$A = 0.4 \left(\frac{m_p C_p \Delta T}{q\phi} \right)^{0.1} \quad (2.3)$$

$$C = 0.6 \left(\frac{m_p C_p \Delta T}{q\phi} \right)^{0.07} \quad (2.4)$$

El grupo adimensional $m_p C_p \Delta T / q\phi$ representa la eficiencia energética y corresponde a π_3 . Entonces la predicción de la relación de humedad resulta en:

$$MR = e^{-0.4 \left(\frac{m_p C_p \Delta T}{q\phi} \right)^{0.1} \left(\frac{\lambda}{v\phi} \right)^{0.6 \left(\frac{m_p C_p \Delta T}{q\phi} \right)^{0.07}}} \quad (2.5)$$

Este modelo de parámetros ajustables se verificó con datos experimentales del secado de jugo de fresa. De acuerdo con su autor, el modelo es razonablemente aceptado para predecir comportamientos con coeficientes de determinación del 97%, ayudar en el diseño, operación, modificación, evaluación del tiempo y tasas de secado, mejorar la calidad y aumentar la eficiencia energética.

❖ Aproximación unificada de Konovalov et al. (2002)

Por otra parte, el sistema de RW se clasifica como un método de secado indirecto o de contacto debido a que el producto no entra en contacto con el medio de transferencia de calor (Nindo y Tang, 2007). El secador RW se puede relacionar estrechamente con el secador de tambor y los secadores de cinta de acero sólido o una combinación de ellos. En estos secadores el fluido de transferencia de calor (vapor saturado, agua caliente, soluciones de glicol, entre otros) no entra en contacto directo con el material húmedo, pero se utiliza para transferir la energía indirectamente a través de la pared de acero, lámina de plástico o cinta de acero.

Un enfoque unificado para entender las cinéticas de secado modelando el secado convectivo de dispersiones líquidas y la transferencia de calor en cilindros de contacto fue desarrollado por Konovalov et al. (2002, 2003 y 2004). La metodología desarrollada está basada en el análisis de las curvas del contenido de humedad-temperatura del material, $T(X)$ o de la temperatura del material-tiempo de secado $T(t)$, para las cuales se observan varias regiones planas llamadas “temperaturas de meseta” (T_{mes}) que existen bajo apropiadas condiciones de secado. Se cree que dichas curvas proveen mayor información que las curvas convencionales de secado porque las mediciones son más confiables que las de las tasas de secado.

En general, para cualquier dispersión líquida, la formación o degeneración de las curvas se describen de acuerdo a las dos temperaturas de meseta más comunes: la primera, está cerca de la temperatura de bulbo húmedo (T_{bh}) o de pseudo bulbo húmedo (T_{pbh}), y la segunda, está situada cerca de la temperatura de ebullición (T_{eb}) o de pseudo ebullición (T_{peb}) de la dispersión líquida. Las mesetas también están vinculadas a otros fenómenos como: fuente de calor suplementaria por conducción o electromagnética, irradiación de ondas (infrarrojo, radiofrecuencia, microondas), migración de las sustancias disueltas, interacción de la transferencia de calor y masa externa, eliminación de líquido físicamente ligado, y muchos más.

Las relaciones $T(X)$ y $T(t)$ están dadas por ecuaciones separadas, de manera que es posible evaluar los términos de la fuente mediante un coeficiente de transferencia equivalente o por condiciones de frontera, para esto se expresa un sistema acoplado de Luikov (Luikov et al., 1965) de dos o tres ecuaciones que contienen 2 o 3 operadores de divergencia (o Laplacianos) que pueden transformarse en un sistema de 2 ecuaciones acopladas en un sólo operador para la difusión de masa y calor, así:

$$\frac{\partial P_i}{\partial t} = A_i \nabla^2 P_i \quad \text{o} \quad \frac{\partial P_i}{\partial t} = a_i \text{div}(k_i \nabla P_i) \quad (2.6)$$

Para la difusión de calor: $P \equiv T, A \equiv \frac{\lambda}{c_p \rho}; a \equiv \frac{1}{c_p \rho}, k \equiv \lambda \quad (2.7)$

Para la difusión de masa: $P \equiv C$ (o u), $A \equiv D$; $a \equiv 1$, $k \equiv D$ (2.8)

donde, a es la difusividad térmica (m^2/s), C es la concentración másica (kg/m^3), C_p es la capacidad calorífica ($\text{J}/\text{kg K}$), D es la difusividad másica (m^2/s), T es la temperatura (K o $^\circ\text{C}$), t es el tiempo (s), λ es la conductividad térmica ($\text{W}/\text{m K}$), ρ es la densidad (kg/m^3) y u es la velocidad (m/s).

Estas ecuaciones pueden aplicarse a cualquier geometría (placas multi-capas, cilindros, esferas o más complicadas) y resolverse analítica o numéricamente. La solución analítica en forma lineal se obtiene con el método de Fourier para intervalos suficientemente pequeños con condiciones de frontera de tercer grado de equivalencia no-simétrica y con distribuciones iniciales. La siguiente es la forma general de la solución para una placa de 4 capas (Konovalov et al., 2003):

$$P_i(x, t) = W_i(x) + \sum_{n=1}^{\infty} A_{in} \sin\left(\frac{\mu_n x}{\sqrt{a_i}} + \varphi_{in}\right) \cdot \exp(-\mu_n^2 t); \quad i = 1, 2, 3, 4 \dots \quad (2.9)$$

Las funciones (P_i , W_i , A_i) y las raíces (φ_{in} , μ_n) de esta solución se dan por expresiones separadas para cada capa. Una aplicación de la solución de este modelo se publicó para la temperatura en Gatapova et al. (2005).

Según Nindo y Tang (2007) el resultado de este estudio puso de manifiesto un fenómeno importante que también se ha observado en el secado RW. En este último se presenta una sola temperatura de meseta, asociada a la T_{bh} ; la segunda no se presenta dado que la temperatura del agua de circulación no supera la temperatura de ebullición del agua. Entonces, para temperaturas del cilindro menores de 100°C , se produce un descenso de la temperatura del material después del calentamiento inicial, seguido de una estabilización de la temperatura debido al gran aumento de la resistencia térmica de la capa seca de material. Sin embargo, el mismo comportamiento se ha observado en otros procesos tales como secado por infrarrojo y microondas (MW) o éstos combinados con el secado aire convectivo (Salagnac et al., 2004, Nowak y Lewicki, 2004). En condiciones normales de IR, MW o

posibles combinaciones, la temperatura de las muestras es menor en comparación con los reportados para procesos de secado más agresivos (secado de tambor o secado por aspersión).

2.2.2 Longitudes de onda de absorción del agua respecto a las longitudes de onda de transmisión del MylarTM en el espectro IR

Dado que en el secado IR, el agua es a la vez el medio de calentamiento y el objeto de secado (muestras como frutas y verduras son aproximadamente el 90% de agua), el análisis de las bandas de absorción de agua en el espectro IR es muy importante. La radiación infrarroja térmica se considera generalmente en el intervalo de 0.1-100 μm y típicamente se divide en infrarrojo cercano NIR (0.75 a 3 μm), infrarrojo medio MIR (3-25 μm), e infrarrojo lejano FIR (25-100 μm) (Almeida et al., 2006). Mediante la exposición de un objeto a la radiación infrarroja, la energía térmica generada puede ser absorbida por los materiales alimenticios. El calentamiento por infrarrojo está ganando popularidad debido a su mayor eficiencia térmica y a su rápida velocidad de calentamiento/tiempo de respuesta en comparación con el calentamiento convencional (Krishnamurthy et al., 2008). Dado que el agua es especialmente importante cuando un material húmedo se expone a la radiación, el estudio de la región del espectro de más interés en el secado por infrarrojo no se ha completado porque las variaciones esperadas en el comportamiento de absorción infrarroja durante la transición de fase del agua (generalmente para cada sustancia) es el resultado de diferentes interacciones moleculares en los diferentes estados físicos (Sandu, 1986).

Según Sandu (1986), las cuatro principales bandas de absorción de agua líquida son 3, 4.7, 6 y 15.3 μm , y la temperatura no tiene efecto significativo sobre las bandas de absorción. Sin embargo, hay algunas regiones del espectro donde la mezcla de agua y los principales compuestos de los alimentos (proteínas, lípidos, azúcares), podrían no presentar "ventanas espectrales" donde las propiedades de absorción al infrarrojo son totalmente diferentes. En esas regiones, la transmisividad a la radiación infrarroja de los alimentos tiene valores más altos y son más eficaces para el secado. Existen dos regiones, la primera corresponde a las

longitudes de onda menores a 2.5 μm , y la segunda menos eficiente es en 4-5.5 μm . Ver Figura 2.2.

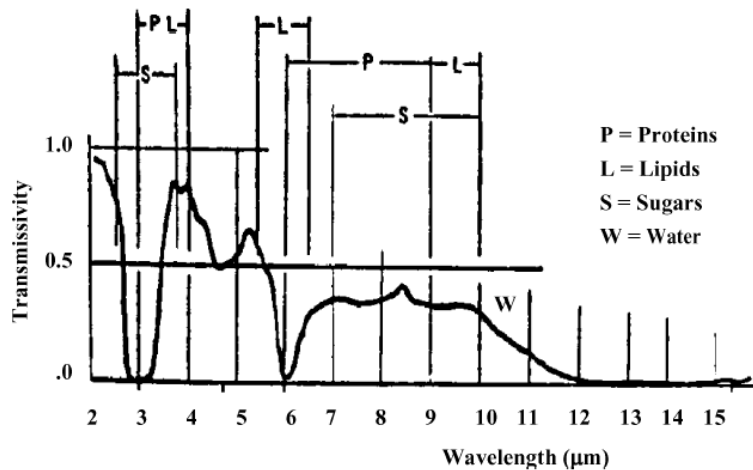
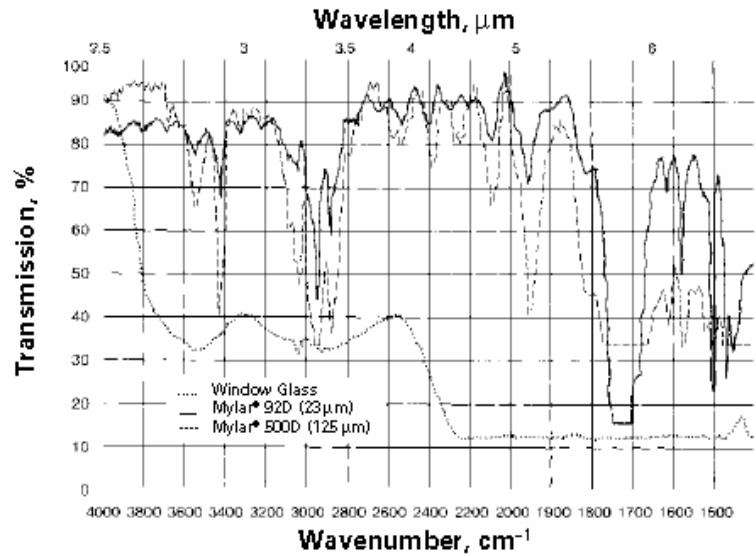


Figura 2.2. Principales bandas de absorción de los componentes de los alimentos respecto a las del agua. Tomado de Sandu (1986).

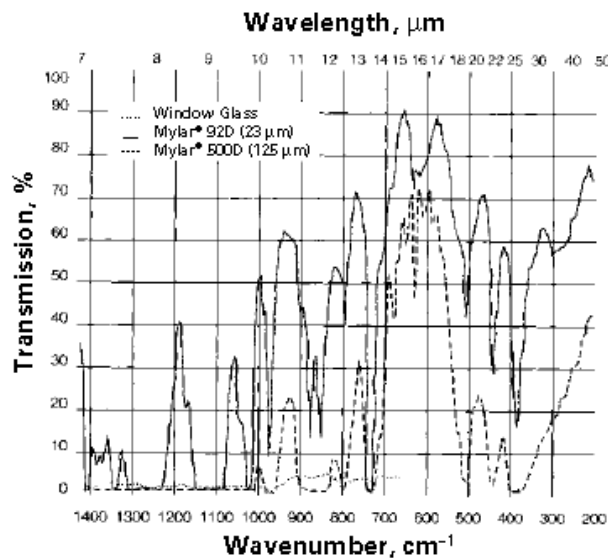
Por otra parte, existen ciertas películas poliméricas casi completamente opacas al espectro IR, que parecen poseer el potencial para competir con el vidrio en muchos aspectos como por ejemplo para ser utilizadas como colectores solares (Tsilingiris et al., 2003). Para predecir el desempeño de alguno de estos materiales en aplicaciones particulares de ingeniería es necesario realizar el cálculo de sus propiedades ópticas. Esta tarea requiere el uso de datos espectrales fiables en una amplia gama de longitudes de onda. Debido a que el MylarTM es el material utilizado como medio transparente a la radiación IR en el secado RW, es importante comparar las regiones longitudes de onda de su alta transmisión con los de alta absorción de agua en los alimentos. MylarTM es una marca registrada de DuPont Teijin Films y nombre comercial dado al Tereftalato de Polietileno (PET es su abreviatura en inglés). Algunas de sus propiedades ópticas están disponibles online (http://usa.dupontteijinfilms.com/informationcenter/downloads/Optical_Properties.pdf).

La Figura 2.3 muestra que hay varias regiones de alta transmisión (alrededor de 90 %) de la energía de IR especialmente en aquellas regiones que coinciden con los de alta absorción de

agua (3, 4.7 y 6 μm). Debido a que la transmisión total de infrarrojo en películas de polímero es una propiedad muy importante para ingeniería, la cual determina su idoneidad para una aplicación específica en un nivel de temperatura dado, hay publicados en la literatura varios espectros para PET (o Mylar™) (Krimm, 1960; Harrick, 1971; Adamov y Savinich, 1979; Labrie et al., 1986; Oromiehie y Meldrum, 1999; Pellerin et al., 2002; Wu et al., 2003 y Fonseca et al., 2013).



(a)



(b)

Figura 2.3 Espectro de transmisión del Mylar™ (a) rangos de longitud de onda bajos y (b) rangos de longitud de onda altos. Tomado de Dupont Teijin Films

Sin embargo, Tsilingiris et al. (2003) hicieron una comparación de resultados de integraciones numéricas de la transmisión total de diferentes membranas poliméricas como una función de la temperatura de la fuente radiante para un espesor de película fija. Las películas estudiadas fueron policarbonato, polietileno, polipropileno, poliéster (mylar), poliamida (kapton) y fluoruro de poli vinil (vinil). Las curvas de Mylar™ exhiben una transmitancia de 16% y 7% aproximadamente para espesores de 0.1 y 0.2 mm, respectivamente a una temperatura de la fuente alrededor de 90°C, que es la temperatura del agua usada en los experimentos de secado RW concernientes al presente estudio (ver Figura 2.4).

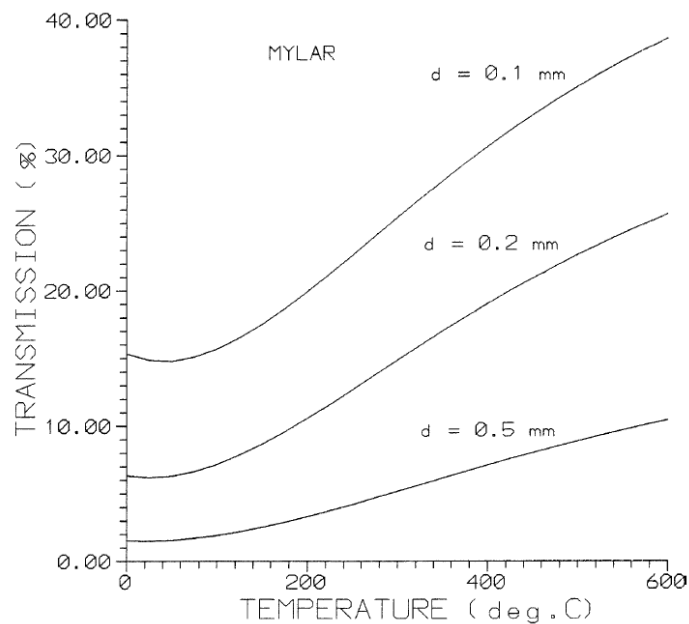


Figura 2.4. Transmisión total calculada para películas de Mylar™ de diferentes espesores para temperaturas en la fuente radiante entre 0 y 600°C. Tomado de Tsilingiris et al. (2003)

El ancho de banda de los rangos de transmisión más bajos se encuentra entre 6.5 y 14.5 μm aproximadamente (Figura 2.5), y hay una tendencia de mayor transmisión a temperaturas en

la fuente más altas, hasta 600°C (Figura 2.4). Para temperaturas menores de 100°C hay una reducción de la transmisión que es seguida por un incremento adicional a temperatura ambiente y a temperaturas aún más bajas. Esto se atribuye a la significativa transmisión de la mayoría de los materiales poliméricos para longitudes de onda mayores que 14 μm .

Los resultados obtenidos para todas las películas de polímero indicaron una transmisión más alta para el polietileno y polipropileno mientras que una transmisión mínima de materiales como fibra de vidrio, Kapton y MylarTM. La diferencia de los datos publicados en fuentes aparentemente confiables confunden ante la consideración del MylarTM como un material “transparente” a la radiación IR en las bandas de absorción del agua, por lo que tal aspecto se convierte en otra insuficiencia del método.

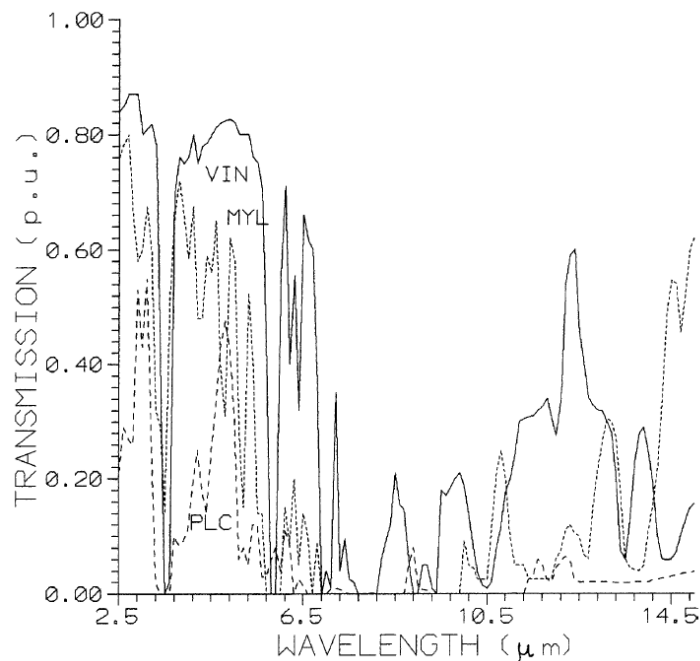


Figura 2.5. Transmisión espectral para películas de vinil (VIN), Mylar (MYL) y policarbonato (PLC). Tomado de Tsilingiris et al. (2003)

2.2.3 Efecto del espesor del material en la absortividad del agua

La radiación infrarroja se transmite a través del agua en longitudes de onda corta, mientras que a longitudes de onda más largas se absorbe en la superficie (Sandu, 1986), pero este comportamiento depende del espesor de la capa de agua. El agua líquida pura tiende a ser totalmente absorbente incluso en pequeños espesores a las principales longitudes de onda de absorción. Para productos alimenticios, en cuanto aumenta el espesor, se produce simultáneamente una disminución de la transmitancia y un aumento de la capacidad de absorción. Para los procesos que utilizan energía IR podrían preferirse los productos delgados ya que la alta transmisividad resultaría en tasas de calentamiento más altas (Pan y Atungulu, 2011). Este aspecto puede ser altamente aplicable en el secado RW.

Alta transmisividad podría obtenerse de longitudes de onda cortas (NIR). Sin embargo, la disminución de la absorptividad y aumento de la transmisividad de NIR durante el secado también podría ser un problema para materiales delgados. En cuanto se secan muestras delgadas, la contracción del material puede resultar en una baja absorción ya que la mayoría de la energía de radiación puede ser reflejada y transmitida a través de la capa delgada. Además, la temperatura de la radiación NIR podría ser demasiada alta para el procesamiento de alimentos y productos agrícolas y aún mantener alta calidad de los mismos. Por lo tanto, el secado de capas delgadas parece ser más eficiente en la región FIR, mientras el secado de cuerpos más gruesos debería dar mejores resultados en la región NIR (Krishnamurthy et al., 2008). Según las aplicaciones, el espesor óptimo de un producto alimenticio y la longitud de onda de radiación seleccionada podrían ser diferentes, basado en la variación de la transmisividad y absorptividad. A medida que el material expuesto a la radiación electromagnética sufre cambios en la temperatura, contenido de humedad, estructura y otras propiedades, las principales características de la radiación también cambian (Almeida et al., 2006).

2.3 RESUMEN DE CAPÍTULO

Los aspectos antes estudiados señalan la necesidad de profundizar en los fenómenos de transporte que rigen el proceso RW debido a los múltiples vacíos a que su análisis conduce.

El agua es importante cuando se desea secar un alimento usando radiación IR por esto es deseable hacerlo en las longitudes de onda donde es máxima su absorptividad. Aparentemente el MylarTM no es altamente transmisor en dichas longitudes de onda. Por su parte, el alimento requiere baja reflectividad, absorptividad alta o media lo cual se traduce en baja transmisividad. Sin embargo, para evitar un calentamiento extremadamente intensivo y daño térmico de la superficie es necesario incrementar su transmisividad. Por estas razones, es importante investigar cada aspecto que se considere relevante para la modelación simultánea de la transferencia de masa y calor en el secado RW de alimentos.

3. TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA EN EL SECADO RW

En este capítulo, el tema central es el estudio experimental de las diferentes formas de transferir calor en el secado RW. Los resultados y su análisis se presentan a continuación.

3.1 EFECTO DE LA CONDUCCIÓN Y LA CONVECCIÓN EN EL SECADO POR VENTANA DE REFRACTANCIA DE TROZOS DE ZAPALLO (*Cucurbita maxima*)

3.1.1 Introducción

Se ha afirmado que en el secado RW, el calor se transfiere por los tres mecanismos (radiación, conducción y convección), aunque el aporte de dichas formas de transferencia no ha sido estudiado fenomenológicamente. Predecir el transporte de masa y calor dentro del alimento y los fenómenos presentes a partir del comportamiento cinético y térmico es uno de los retos por resolver en el secado por ventana de refractancia. Por esta y otras razones que causan insuficiencias en el método RW, se discutirá en este capítulo el aporte de la radiación comparada con los demás mecanismos de transferencia de calor presentes bajo la hipótesis de que al cubrir la lámina transparente a la radiación (Mylar™) con un material reflectivo (papel aluminio) por el lado de la fuente de calor (agua caliente), la transferencia de calor por radiación desde el agua hasta el alimento se reduce, y la transmisión de energía será principalmente por conducción. Proceso al que el autor se referirá como “hidrosecado conductivo”. También se presentarán resultados de mediciones de la radiación global en el secado RW.

3.1.2 Zapallo (*Cucurbita maxima*)

Aunque este trabajo está enfocado en el proceso (no en el producto), se seleccionó al zapallo como alimento modelo. Zapallo (en Latinoamérica: zapallo, ahuyama, ayote o calabaza) se refiere a cualquiera de varias especies de calabazas tropicales del género *Cucurbita*. Dos especies nativas muy comunes son *Cucurbita maxima* y *Cucurbita moschata* originarias de Centroamérica o Suramérica. Los frutos de la *Cucurbitáceas* son grandes, de forma redonda

u ovalada y de pesaje elevado (2 - 5 kg). La corteza puede ser blanda o dura (Castilho-Garcia et al., 2007; Fedha et al., 2010). Se usa ya sea como verdura o como ingrediente para tortas, sopas, guisos y panes, también se procesa para obtener jugo, pulpa, encurtidos y productos secos (Nawirska et al., 2009; Guiné et al., 2011). Por la baja tendencia a acumular metales pesados y nitratos puede recomendarse para productos alimenticios para bebés (Konopacka et al., 2010). Los cinco países mayores productores en el mundo son China, India, Ucrania, Egipto y Estados Unidos (Doymaz, 2007).

La especie de zapallo *C. maxima* (Ver Figura 3.1), es una buena y prometedora fuente de sustancias lipofílicas como los carotenoides (α y β -caroteno, principalmente), responsables del atractivo color de la pulpa (amarillo a naranja) y se cree que reducen el riesgo de desarrollar algunas enfermedades degenerativas. Investigaciones recientes indican que una dieta rica en alimentos que contienen β -caroteno puede reducir el riesgo de desarrollar ciertos tipos de cáncer y ofrecer protección contra enfermedades del corazón, principalmente por su significativa actividad antioxidante (Konopacka et al., 2010). Además, el buen desempeño de los productos con fibra de calabaza en relación con el agua y la glucosa destaca la posibilidad de su uso como ingredientes alimentarios incluso fuera de temporada (de Escalada et al., 2007).



Figura 3.1. Zapallo (*Cucurbita maxima*)

Su alto valor nutricional se debe principalmente al contenido total de carotenoides (2 – 10 mg/100 g), al contenido de vitamina C (9 - 10 mg/100 g) y de vitamina E (1.03 – 1.06 mg), pero también es una fuente valiosa de otras vitaminas (B6, K, tiamina y riboflavina), de polisacáridos (glucosa, fructosa, sucrosa y almidón), de componentes minerales (potasio,

calcio, fósforo, magnesio, hierro y selenio) y pectinas (Nawirska et al., 2009; Konopacka et al., 2010; Jacobo-Valenzuela et al., 2011).

En Colombia el cultivo de *C. máxima* que es la cucurbitácea más común, se caracteriza por su amplia dispersión en gran parte del país. El producto obtenido se destina al mercado nacional para consumo en fresco. Casi todo el material que se siembra es nativo y presenta una gran variabilidad en cuanto a tamaño, forma y color de fruto, grosor y textura de pulpa, color y tamaño de la semilla, etc. En la región, en el departamento del Valle del Cauca se cultiva zapallo en los municipios de Restrepo, Pradera, Candelaria, El Cerrito (<http://vegetalespopayan.jimdo.com/prod-vegetales/ahuyama/>).

En la agricultura, así como en la industria alimentaria y farmacéutica, ha habido un interés creciente tanto en la fruta de la calabaza como en sus derivados. Por ser altamente insaturados, los zapallos son propensos a la oxidación durante el procesamiento a causa del contacto con ácidos, tratamiento térmico y exposición a la luz, resultando en cierta pérdida de color y alteración de su actividad biológica (Castilho-Garcia et al., 2007). Sin embargo, los frutos frescos son muy sensibles al deterioro microbiano, incluso a condiciones de refrigeración, ya que su almacenamiento genera varios cambios en la composición química, todos ellos conectados con procesos vitales como la respiración, transpiración y envejecimiento los cuales causan cambios desfavorables en la calidad biológica y sensorial, por lo que deben congelarse o secarse (Doymaz, 2007; Sojak y Glowacki, 2010; Guiné et al., 2011). El método para secar apropiadamente el material crudo debe procurar buena calidad del producto final en cuanto a apariencia, nutrientes y propiedades sensoriales, por tal motivo, se han desarrollado varias tecnologías que incluyen pre-tratamientos y el secado mismo. Sin embargo, hay información e investigación limitada sobre el secado de zapallo en la literatura.

3.1.3 Secado de zapallo

El secado con aire es el método más usado para secar zapallo. Doymaz (2007) investigó las características del secado convectivo de rodajas de zapallo en un secador de aire forzado caliente, encontrando entre varios modelos el que mejor satisface la cinética de secado de sus

muestras. En un secador de ciclón convectivo, Akpinar (2006) estudió la modelación matemática de capa delgada de rodajas de papa, manzana y zapallo para estimar y seleccionar entre 13 modelos, la ecuación de la curva de secado más apropiada. El efecto del secado convectivo con aire a diferentes temperaturas sobre las propiedades químicas de la especie *C. máxima* fue estudiada por Guiné et al. (2011). Estos autores emplearon diversos modelos para representar las curvas de secado y reportaron que el de Page y Page modificado son los que más se ajustan.

Otros métodos de secado también se han usado con el fin de mejorar la calidad de los frutos y semillas. Por ejemplo, Awogbemi et al. (2009), estudiaron los efectos del secado solar en algunos vegetales de Nigeria incluyendo el zapallo estriado (ugu) y presentaron análisis proximales y microbiales después del secado, encontrando que la composición nutricional del vegetal fresco y su carga microbiana decrecen con cada día de secado. Con el fin de determinar el encogimiento, la cinética y otras propiedades características de 12 cultivares de zapallo, Nawirska et al. (2009) compararon el secado de estas especies por 4 métodos diferentes: convectivo, microondas a vacío, vacío y liofilización, hallando que los últimos tres métodos fueron más efectivos.

La cinética de secado por deshidratación osmótica, el encogimiento y las difusividades efectivas de rodajas de zapallo impregnadas en soluciones de sacarosa fueron evaluados por Castilho-Garcia et al. (2007). Algunas muestras impregnadas con solución de sacarosa fueron secadas también con aire caliente alcanzando un incremento de la transferencia de masa. El efecto del secado en un secador eléctrico sobre la composición proximal de dos especies de zapallo (*C. moschata* y *C. maxima*) fue investigada por Fedha et al. (2010). Los resultados mostraron mayor contenido de proteína en la *C. máxima* pero el contenido de humedad y de cenizas fue más alto en la *C. moschata*.

Sojak y Glowacki (2010) analizaron las cinéticas del secado de una variedad de calabaza gigante usando convección natural y convección forzada en un secador de túnel, uno de lecho fluidizado y en el secado combinado en dos etapas en túnel y lecho fluidizado. Los resultados verificaron los modelos teóricos de la cinética en el primer periodo de secado tomando en consideración el volumen de encogimiento de las muestras. Konopacka et al. (2010) presentaron la conveniencia de producir snacks crujientes de zapallo listos para comer en dos presentaciones: chips y cubos porosos a partir de dos métodos de secado desarrollados exclusivamente para este fin los cuales favorecen la retención de los carotenoides responsables del intenso color amarillo a naranja del producto.

A pesar del número de trabajos recientes relacionados con el secado de zapallo por diversas técnicas, sólo en el trabajo de Nindo et al. (2003a) reportaron el uso del secado RW para determinar y comparar las características de reducción microbiana del puré de zapallo fresco y seco, y la eficiencia energética de esta tecnología. No se conocen más estudios que reporten esta aplicación en particular.

Con el objeto de estudiar los efectos de la convección externa (forzada y natural) y de la radiación infrarroja durante el secado RW sobre la humedad global y la temperatura local en trozos de zapallo se realizó un estudio experimental que se detalla en la siguiente sección. El uso de zapallo como alimento modelo no tiene como fin el seguimiento de sus cambios fisicoquímicos únicamente el análisis del desempeño del equipo y del proceso.

3.1.4 Materiales y Métodos

Los experimentos se realizaron en el laboratorio de Análisis Químico de Alimentos de la Escuela de Ingeniería de Alimentos de la Universidad del Valle. La fruta fresca se adquirió en un supermercado local y se utilizaron zapallos de aproximadamente 3.5 kg, con un contenido de sólidos solubles de 5.27 ± 1.7 °Brix, y un contenido de humedad de $92.23 \pm 1.85\%$ (bh). La fruta se lavó y peló, se removió la semilla y la pulpa se cortó en segmentos grandes

paralelos al eje de la fruta. Estos a su vez se pasaron por un cortador de verduras manual (marca Home Collection) con cortes perpendiculares a la longitud de los segmentos de 1 cm x 1 cm, aprox. (ancho x espesor). La longitud de las trozos (6 cm aprox.) se acondicionó con un tajador de cuchilla fabricado para tal fin Ver Figura 3.2).



Figura 3.2. Tamaño y forma de los trozos de zapallo usados en los experimentos

Los factores experimentales fueron: la convección (natural y forzada) y la membrana para el secado (Mylar™ y Mylar™ cubierta con papel aluminio). Las variables de respuesta fueron el contenido de humedad (bh) y la temperatura en tres niveles del espesor de las muestras (inferior, medio y superior). Para el estudio del contenido de humedad se empleó un diseño factorial 2^2 y para la temperatura se usó un diseño factorial $2 \times 2 \times 3$ (incluyendo el nivel de la muestra al que se midió la temperatura).

Los experimentos se realizaron en un baño termostático de 5.5 litros de acero inoxidable (marca Precision General Purpose Water Baths) y lleno con agua del grifo. La superficie del agua se cubrió con una película plástica transparente al infrarrojo (Mylar™) de 0.26 mm de espesor y área de $17 \times 30 \text{ cm}^2$. Las muestras (40 trozos homogéneos) fueron cuidadosa y ordenadamente dispuestas sobre la película de secado para cada prueba. Se realizaron experimentos paralelos cubriendo la película plástica (Mylar™) con papel aluminio por el lado en contacto con el agua. El esquema del equipo usado para el secado se muestra en la

Figura 3.3. La temperatura del baño se fijó en $90\pm 2^{\circ}\text{C}$ y se registró cada 5 min con un termómetro de bulbo de mercurio calibrado ($0-100^{\circ}\text{C}$).

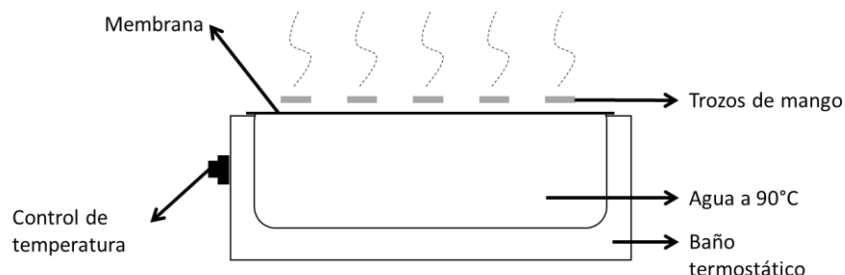


Figura 3.3. Esquema del secador RW. Adaptado de Ochoa et al., 2012.

Todos los experimentos se llevaron a cabo a condiciones ambiente del laboratorio (24°C y 73% HR). Para las pruebas de convección forzada se ubicó un ventilador cerca del secador para ayudar a la remoción de humedad. La velocidad del aire (0.5 ± 0.2 m/s) fue medida con un anemómetro digital (marca AIRFLOWTM). El contenido de humedad inicial de las muestras se determinó mediante el método de estufa a 60°C hasta humedad constante durante 24 horas (AOAC n.20.013, 1980). El contenido promedio de humedad inicial fue de 92.23 ± 1.85 % (bh). Cada determinación se realizó por duplicado.

La pérdida de peso se evaluó en el tiempo a intervalos de 10 min empleando una balanza digital (marca Ohaus® AdventurerTM) con una precisión de 0.01 g. Para medir la temperatura de los trozos de zapallo se empleó un sistema de monitoreo electrónico para 10 señales con termopares tipo J con precisión de $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ y registro cada 30 seg (ver Figura 3.4). Los termopares se insertaron dentro del producto en diferentes posiciones del espesor (inferior, medio y superior) y se tomaron tres réplicas en diferentes puntos sobre la membrana de secado.

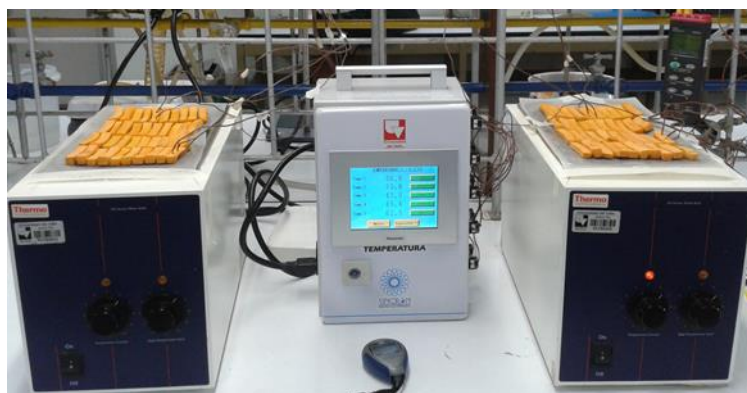


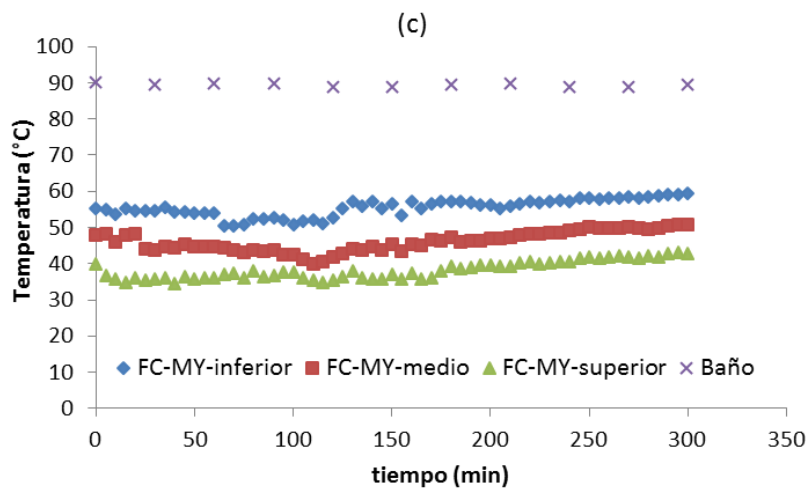
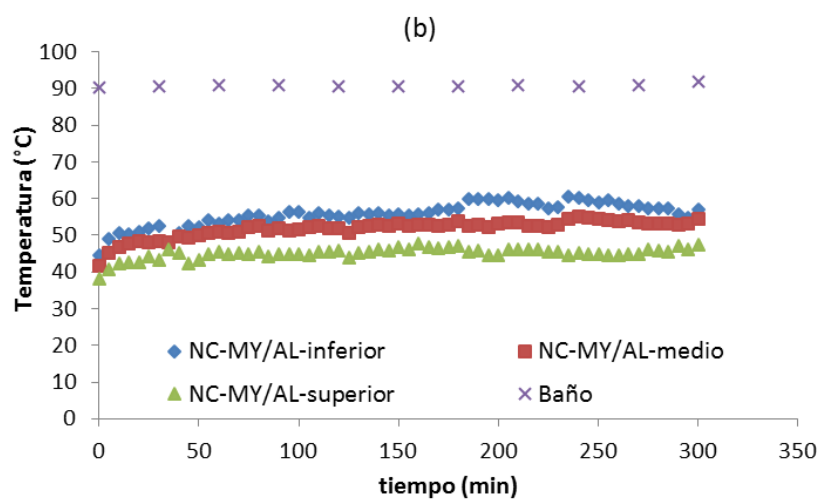
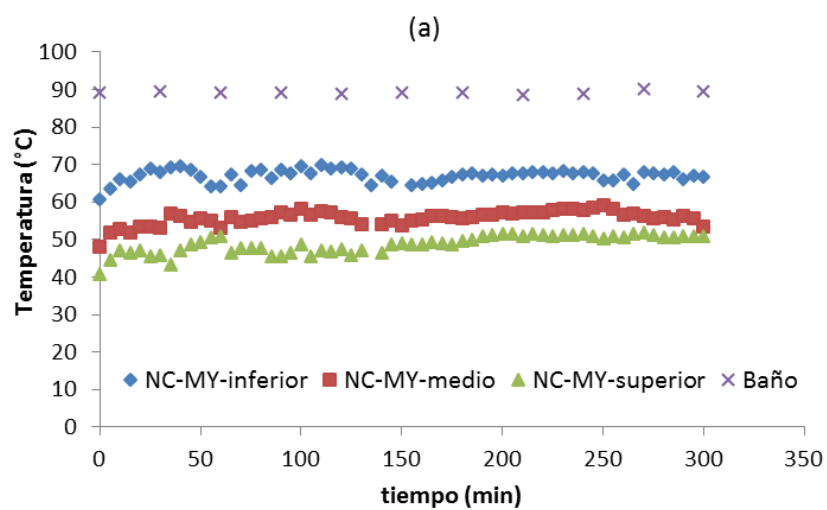
Figura 3.4. Montaje del experimento para secado RW (con lámina de Mylar™)

Se hizo un análisis de varianza (ANOVA) usando el programa estadístico Minitab (Minitab 15.1.0.0) a un nivel del 5% de significancia. El análisis incluyó las distribuciones en el tiempo de la temperatura en tres niveles del espesor (inferior, medio y superior) y del contenido de humedad para los cuatro tratamientos CN-MY, CF-MY, CN-MY/AL y CF-MY/AL (C. natural- Mylar™, C. forzada- Mylar™, C. natural- Mylar™ forrada con papel aluminio y C. forzada- Mylar™ forrada con papel aluminio, respectivamente).

3.1.5 Resultados y Discusión

3.1.5.1 Distribución de temperatura

Los perfiles de temperatura para los cuatro tratamientos se muestran en las Figuras 3.5 y 3.6. Por ser la zona inferior más caliente al estar expuesta a la temperatura del baño y, la región superior la más fría por estar expuesta al aire circundante y a los efectos evaporativos, la tendencia es $T_{inf} > T_{med} > T_{sup}$ en todos los casos. De la Figura 3.5 puede notarse que el comportamiento de las temperaturas en el tiempo fue casi constante.



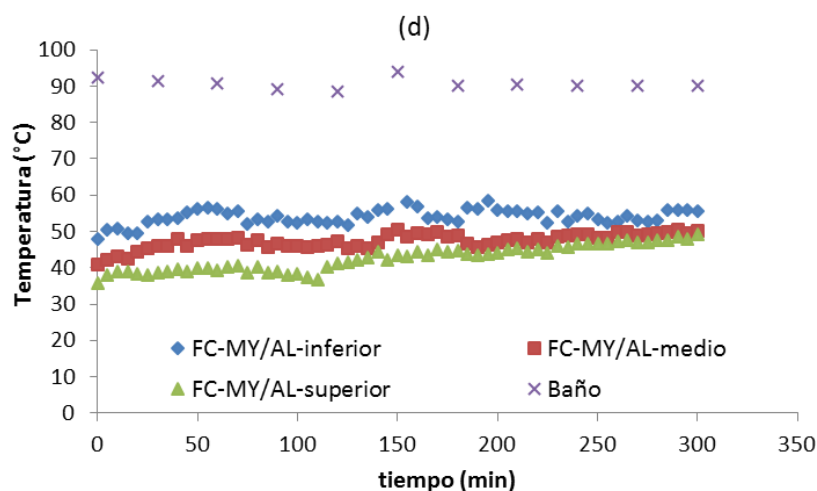


Figura 3.5. Perfiles de temperatura en tres posiciones del espesor de la muestra (inferior, medio y superior) para los cuatro tratamientos (a) NC-MY, (b) NC-MY/AL, (c) FC-MY y (d) FC-MY/AL

Para cualquiera de los tratamientos y en todas las posiciones del espesor, las muestras alcanzaron temperaturas por debajo del agua del baño (90°C) y de la superficie de las membranas de Mylar™ (82.5°C) y de Mylar™ con papel aluminio (60°C). Este mismo comportamiento ha sido reportado por varios investigadores para el secado RW (con Mylar™) de purés, jugos, y rodajas de variadas frutas y verduras (Abonyi et al., 2001; Nindo et al., 2003a; Nindo et al., 2007; Ochoa et al., 2012).

Con el ANOVA para un tiempo fijo de 5 h, se verificó que el tipo de convección y la interacción lámina-convección tienen significancia en las tres posiciones de la muestra pero el tipo de lámina presentó diferencias significativas en la posición inferior únicamente ($p < 0.05$). Esto último sugiere que sólo cerca a la lámina se puede observar el efecto de bloqueo de la radiación con el papel aluminio debido a la baja penetración que tiene el calor por radiación.

La Tabla 3.1 resume los promedios de temperatura en cada uno de los tratamientos para 5 h de secado. En estos no se incluyeron los registros durante los primeros 10 min aproximadamente, periodo que corresponde al calentamiento inicial de las muestras.

Tabla 3.1 Temperaturas promedio en las zonas superior e inferior de las muestras

Tratamiento	T_{sup} (°C)	T_{inf} (°C)	ΔT (°C)
NC-MY	48.91±4.98	67.08±6.06	18.17
NC-MY/AL	45.11±2.55	55.89±5.42	10.78
FC-MY	38.54±2.39	55.75±4.15	17.22
FC-MY/AL	43.15±5.90	54.03±6.96	10.88

Si se observa la tendencia global de las temperaturas (Figura 3.5 y Tabla 3.1), en la zona superior se cumple que NC-MY > NC-MY/AL > FC-MY/AL > FC-MY. La presencia de aire frío circulando forzosamente mantiene más bajas las temperaturas que las expuestas a convección natural, principalmente en la zona superior.

Según la Tabla 3.1, la temperatura en la zona inferior del tratamiento NC-MY/AL es menor que para el tratamiento NC-MY (véase también Figura 3.5a y 3.5b). La aparente inhibición de la transferencia de calor por radiación debida al papel aluminio mantiene la temperatura en la membrana más baja que la lámina sin papel aluminio; este factor sumado a la ausencia del aire forzado permite mantener las temperaturas bajas comparadas con las temperaturas del tratamiento NC-MY. Esta diferencia no se observó al comparar los tratamientos FC-MY (Figura 3.5c) y FC-MY/AL (Figura 3.5d), probablemente por el efecto del aire circulando forzosamente que aumenta la evaporación superficial tanto en la zona superior como en la inferior y hace que la transferencia de calor por radiación (con conducción pobre) del tratamiento FC-MY sea equivalente a la transferencia de calor por conducción (con radiación inhibida) del tratamiento FC-MY/AL.

Se puede también observar que las diferencias de temperatura (ΔT) entre las zonas inferior y superior son del mismo orden según el tipo de membrana de secado, alrededor de 17.5°C para los tratamientos con Mylar™ (sin papel aluminio) y de 10°C para los tratamientos con MY/AL. Lo anterior confirma que hay un efecto inhibidor de la radiación por parte del papel aluminio.

Los registros individuales más altos de temperatura (60-70°C) se encontraron en la zona inferior de la corrida NC-MY (Figura 3.5a), mientras que los más bajos (34-43°C) se observaron en la zona superior de la corrida FC-MY (Figura 3.5c). Teniendo en cuenta que la penetración de calor radiante en la muestra es muy baja, las muestras estarán más calientes en la parte inferior como sucede con NC-MY pero esto mismo no ocurre con las muestras de FC-MY porque el efecto del aire circulando forzosamente sumado a la evaporación superficial contrarresta la acción de la transferencia de calor interna en el producto, como ya se mencionó. En la zona media, los rangos fueron uniformes entre los tratamientos (40-55°C), a excepción del tratamiento NC-MY (48-59°C).

Si se analiza el efecto del tipo de lámina se puede observar que en las corridas con MY únicamente (Figura 3.5a y 3.5c), las temperaturas de las tres zonas alcanzaron rápidamente un valor máximo. Desde allí su perfil permanece casi constante salvo algunas fluctuaciones debidas a los ruidos propios de la experimentación. En cambio, las muestras deshidratadas sobre MY/AL (Figura 3.5b y 3.5d) muestran una pequeña tendencia al aumento posiblemente porque la disminución en el contenido de agua a evaporar y la continua alimentación de calor (por conducción) que se convierte en calor sensible provocan sobrecalentamiento de las muestras. Estadísticamente, no existen diferencias significativas entre MY y MY/AL con convección forzada en la temperatura de la zona superior de las muestras, como se mencionó previamente. En la zona inferior tampoco se evidenciaron diferencias significativas.

De acuerdo a Nindo y Tang (2007) al secar mediante RW, se presenta una estabilización de temperatura debido al incremento de la resistencia térmica de la capa de producto seco permitiendo que el producto se seque a temperaturas moderadas y sin mayor degradación. Al

eliminar humedad, se cierra la ventana que permite el paso de la radiación, entonces la transferencia de calor disminuye y el proceso se autorregula a favor de la intensificación del sabor y de los estándares de calidad del producto. Según el perfil de temperatura típico en la superficie de las muestras durante el secado RW publicado por otros autores (Abonyi et al., 1999; Nindo et al., 2003a y Ochoa et al., 2012) hay una zona de calentamiento inicial y luego una zona de estabilización (lineal) cuando se alcanza el equilibrio térmico, lo cual concuerda con los resultados mostrados en este trabajo.

Al analizar el efecto de la convección, se nota que los rangos generales de temperatura en las corridas con convección forzada FC-MY y FC-MY/AL (Figura 3.5c y 3.5d) son similares. No obstante, en las corridas con convección natural NC-MY y NC-MY/AL (Figura 3.5a y 3.5b), los rangos de temperatura presentan alta diferencia entre ellas. En esta última, las temperaturas son menores en la zona inferior haciendo que se mantengan menos calientes y con perfiles muy cercanos a los de convección forzada. Aunque la interacción convección-lámina tiene mucho que ver en la participación de los diferentes mecanismos de calor sobre la pérdida de humedad de las muestras, la similitud de rangos de temperatura mencionada entre tratamientos con papel aluminio puede atribuirse a que la transferencia de masa puede tener una importante participación que compensa lo que no se alcanza con la transferencia de calor.

El efecto del tipo de convección en las tres zonas de la muestra se presenta en la Figura 3.6. Es claro que las muestras secadas con convección forzada muestran temperaturas más bajas que con convección natural. Sin embargo, debido al efecto significativo de la interacción lámina-convección, el hecho de que las muestras estén menos o más calientes depende no sólo de las condiciones del aire sino del tipo de película usada para el secado, como ya se discutió.

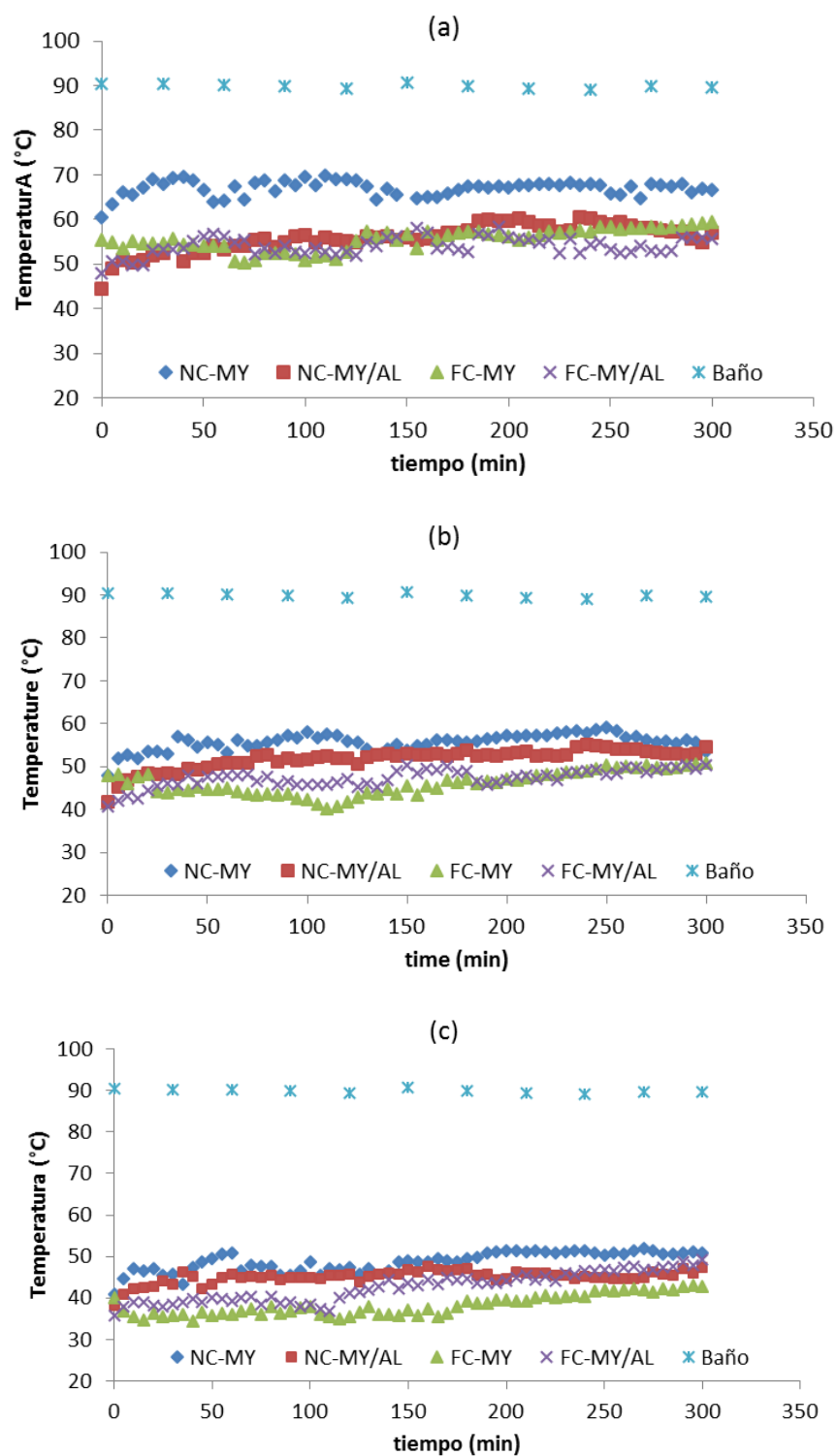


Figura 3.6. Perfil de temperatura de la muestra en tres niveles del espesor. (a) inferior, (b) medio y (c) superior

La eliminación de humedad por convección y evaporación de agua desde la superficie de las muestras se debe principalmente a la velocidad y la temperatura del aire y, al gradiente de humedad en la interfase, pero la aparente resistencia provista por los demás procesos internos de transferencia de calor y de masa, pueden estar causando una competencia entre fenómenos, por eso ocurre la diferencia esperada entre posiciones de la muestra. Sin embargo, al observar los perfiles de los cuatro tratamientos esta diferencia no es muy notable para las temperaturas media (Figura 3.6b) y superior (Figura 3.6c) ya que presentan valores muy cercanos y agrupados según el tipo de convección. Se observa que en las zonas media y superior, son mayores las temperaturas de las corridas con convección natural (menor coeficiente convectivo de transferencia de calor) que las de convección forzada.

Ochoa et al. (2012) reportaron durante el secado RW de rodajas de mango de 1 mm de espesor y temperatura del agua a 90°C, una temperatura en la superficie de la muestra cercana a 72°C y así se mantiene hasta finalizar el secado a los 60 min. Mientras que en el secado convectivo con aire a 90°C, la temperatura de la muestra mantiene una tendencia creciente y alcanza 80°C después de 60 min. Por su parte, Sojak y Glowacki (2010) midieron los cambios de temperatura en la superficie de cubos de ahuyama en una cámara de secado en convección natural a 80°C. La temperatura de las muestras se estabilizó cuando alcanzaron una temperatura cercana a 80°C. Lo anterior demuestra que aunque la temperatura del secado convectivo sea más baja que la del secado RW, las muestras deshidratadas por este último, experimentan temperaturas más bajas en su superficie (y menor tiempo de exposición) en beneficio de la calidad del producto.

3.1.5.2 Cálculos de calor

Se hicieron cálculos de calor en estado estacionario, tomando como sistemas, el agua del baño (w), la lámina (m) (MY o MY/AL), la muestra de alimento a secar (p) y el aire (a). En la Figura 3.7 se presenta un diagrama del sistema analizado con la nomenclatura usada para los cálculos de calor.

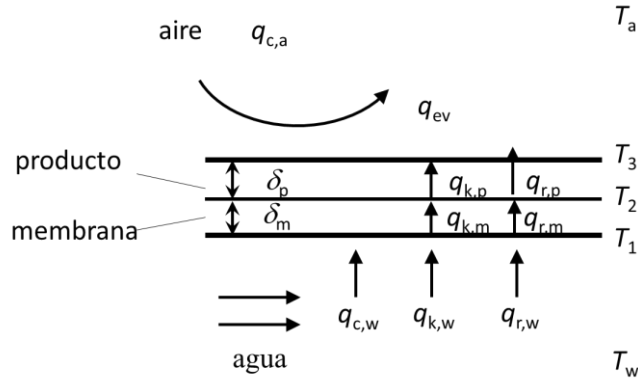


Figura 3.7. Diagrama de los flujos de calor del sistema de secado estudiado. Adaptado de Nindo y Tang (2007).

Los calores por convección q_c (W), conducción q_k (W) y radiación q_r (W), se calcularon a partir de las ecuaciones 3.1-3.8, y según el sistema de análisis:

$$q_{c,w} = h_w A (T_w - T_1) \quad (3.1)$$

$$q_{c,a} = h_a A (T_3 - T_a) \quad (3.2)$$

$$q_{k,w} = \frac{k_w A}{L} (T_w - T_1) \quad (3.3)$$

$$q_{k,m} = \frac{k_m A}{\delta_m} (T_1 - T_2) \quad (3.4)$$

$$q_{k,p} = \frac{k_p A}{\delta_p} (T_2 - T_3) \quad (3.5)$$

$$q_{r,w} = \varepsilon_w \sigma A (T_w^4) \quad (3.6)$$

$$q_{r,m} = \varepsilon_m \sigma A (T_1^4 - T_2^4) \quad (3.7)$$

$$q_{r,p} = \varepsilon_p \sigma A (T_2^4 - T_3^4) \quad (3.8)$$

donde, h es el coeficiente convectivo de transferencia de calor del medio ($\text{W/m}^2 \text{K}$), A es el área transversal al flujo de calor (m^2) la cual se consideró igual en todos los sistemas, k es la conductividad térmica del material (W/m K), T_w y T_a son las temperaturas del agua caliente y del aire (K), respectivamente, T_1 , T_2 y T_3 son las temperaturas de interfase entre el agua, la lámina y el material a secar (K), respectivamente, L es la altura de agua que ocupa el baño (m), δ_m y δ_p son los espesores de la lámina y del producto (m), respectivamente, ε es la

emisividad del material (ϵ) y σ es la constante de Stefan-Boltzman (5.670373×10^{-8} W/m² K⁴). El calor total q_t (W) se calculó como la suma de los calores antes mencionados. El calor (o potencia eléctrica, Q (W)) necesario para calentar el agua se obtuvo a partir de la analogía eléctrica mediante:

$$Q = VI \quad (3.9)$$

donde, V es el voltaje (voltios) y I es la intensidad de corriente (amperios).

Las pérdidas de calor por evaporación se calcularon a partir del balance de calor en el producto teniendo en cuenta los perfiles de humedad experimentales. En la Tabla 3.2 se resumen los resultados.

Tabla 3.2. Valores de propiedades y condiciones usadas para el cálculo de calor en los sistemas de estudio agua, lámina, alimento y aire

Propiedad	Agua	Lámina		Muestra		Aire (forzado)	
		MY	MY/AL	Sobre MY	Sobre MY/AL	Sobre MY	Sobre MY/AL
A (m)	0.045	0.045		0.045		0.045	
δ (mm)	---	0.25	0.25/0.20	10		---	---
k (W/m K)	0.68	0.24	0.24/235	0.5		---	---
h (W/m ² K)	866.7	---		---		10-20	
ϵ (adim)	0.96	0.90	0.9/0.03	---		---	---
T_w (°C)	90	---	---	---	---	---	---
T_1 (°C)	85	85	85	---	---	---	---
T_2 (°C)	---	82.5	60	---	---	---	---
T_2' (°C)*	---	---	---	54.15	53.49	---	---
T_3 (°C)	---	---	---	36.51	40.38	---	---
T_a (°C)	---	---	---	---	---	24	
Q (W)	272.2	---	---	---	---	---	---
q_c (W)	195	---	---	---	---	21.24***	18.34***
q_r (W)	42.75	1.05	0.72/ 1.4E-3	5.43	4.17	---	---
q_k (W)	1.02	108	90.72/ 158.63**	39.69	29.95	---	---
$q_t = q_c + q_r + q_k$	238.77	109.05	91.44/ 158.63	45.12	34.12	---	---
q_{ev}	---	---	---	42.68	38.98	---	---

- * Valor usado para el cálculo de calor en el alimento
- ** $5287.6 (-97\%) = 158.6\text{W}$
- *** Valores obtenidos del balance de calor en las muestras

Puesto que la temperatura registrada por el termopar inferior en la muestra (T_2') es diferente a la temperatura en la superficie exterior de la membrana (T_2), se cree que se forma una pequeña capa de aire que causa enfriamiento evaporativo en la parte inferior del producto además del aire considerado en la parte superior (Figura 3.7). Dicha pérdida de calor en el fondo de la muestra debe ser menor que en la superficie, dependiendo del espesor de la capa y de la combinación de los efectos que se estudiaron. Sin embargo, el análisis de esta capa de aire no se incluye en este trabajo.

Manteniendo el baño controlado a $90 \pm 2^\circ\text{C}$ para todos los tratamientos y sabiendo que del agua caliente se pueden aprovechar las tres formas de transferir calor se encontró que el aporte total de calor fue de 238.77 W . Pero éste es alto comparado con el calor total a través de la lámina de MylarTM sin papel aluminio (109.05 W), indicando que no hay buena transferencia de energía. Aunque hay presencia de calor radiante (1.05 W), este es mucho más bajo que el aporte por conducción (108 W). Este último se debe al bajo espesor de la lámina que reduce la resistencia a la transferencia de calor a pesar de que el MylarTM se considera un pobre conductor de calor ($k = 0.15 - 0.24\text{ W/mK}$). A través de las muestras de zapallo sobre MylarTM (secado RW) se transfieren 45.12 W , que corresponde al 41.4% del calor disponible en la membrana y se requieren 42.68 W para evaporar la humedad que corresponden al 39.13%. Según Nindo et al. (2007) esta evaporación es muy intensa en el secado RW y como lo señalan los datos constituye una gran parte del consumo de energía.

Por otra parte, la alta conductividad térmica del papel aluminio ($k = 235\text{ W/mK}$) proporciona un elevado calor por conducción en la lámina MY/AL (5287.6 W). El papel aluminio por ser de superficie brillante tiene un alto valor de reflectancia térmica (0.97) y una baja emisividad térmica (0.03), en otras palabras refleja el 97% de la energía térmica radiante y emite sólo 3%. Además, al cubrir el MylarTM con papel aluminio por una de las caras quedan burbujas

de aire atrapadas entre ambos materiales actuando éste último como un aislante excelente contra la conducción y la convección (Mason, 1933). Entonces, la baja emisividad térmica del papel aluminio y la baja conductividad térmica del aire proveen un aislamiento térmico. La radiación térmica se refleja hacia el agua y el calor es absorbido por el cuerpo en contacto de más baja temperatura. Es probable que por estas razones, la superficie de la membrana MY/AL en contacto con las muestras se mantenga a menor temperatura comparada con el secado con MylarTM sin papel aluminio.

Para los cálculos se consideró que en la delgada capa de papel aluminio se aísla el 97% del calor por conducción obteniéndose un valor de 158.6 W, pero sólo se transfieren 91.44 W a través del MylarTM. La muestra secada en la lámina compuesta MY/AL transfiere 34.12 W que usa para secarse, y 38.98 W para evaporar la humedad que corresponden al 37.31% y 42.62% del calor entregado por la membrana, respectivamente.

El agua caliente ofrece mucho más calor (238.77 W) del que las láminas transfieren por conducción y radiación (45.67% para MY y 38.29% para MY/AL), lo cual se traduce en considerables pérdidas de energía. En el caso del secado RW, porque el MylarTM transmite baja energía radiante y hay alta evaporación; en el caso del hidrosecado conductivo (MY/AL), porque el baño usa la energía reflejada por el papel aluminio para calentar el agua pero aísla más del 95% de la energía térmica entonces requiere menos energía eléctrica de la que se le provee, además de la alta evaporación en las muestras. Lo anterior se pudo comprobar con la observación directa de la frecuencia de encendido/apagado del control del baño. Para el secado RW la resistencia del baño estuvo encendida durante el 100% del tiempo del ensayo, mientras que para el hidrosecado conductivo sólo estuvo encendida 37.8% del tiempo, por lo tanto el primer método aprovecha el 32.2% de la energía eléctrica alimentada frente al 72.4% que aprovecha el segundo.

3.1.5.3 Curvas de humedad

Los perfiles de humedad para 5h de secado de los cuatro tratamientos se presentan en la Figura 3.8, en donde las diferencias entre ellos debidas al efecto de los tratamientos se hacen

evidentes. Para el tiempo de secado mencionado, el contenido de humedad más bajo fue obtenido con FC-MY/AL con un valor de 2.35% (bh), en contraste con el valor más alto (76.09 % bh) obtenido con NC-MY.

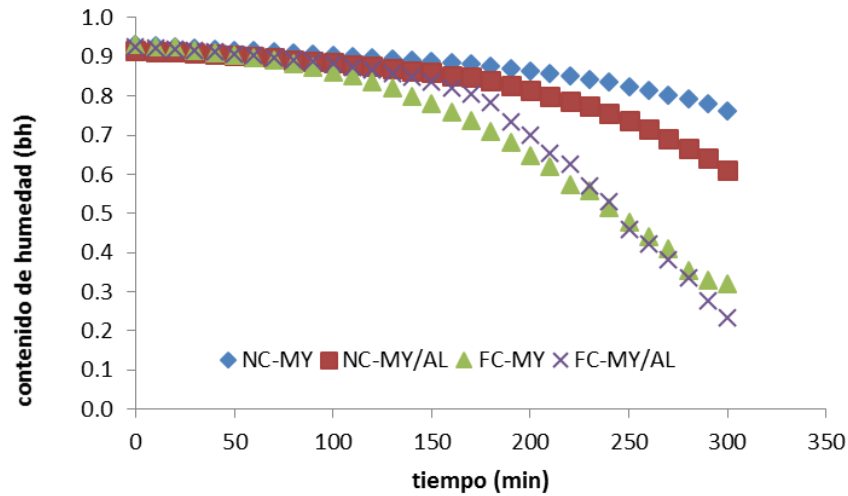


Figura 3.8. Curvas para 5 h de secado de los cuatro tratamientos: NC-MY (convección natural- MylarTM), FC-MY (convección forzada- MylarTM), NC-MY/AL (convección natural- MylarTM con papel aluminio) y FC-MY/AL (convección forzada- MylarTM con papel aluminio)

Si se analiza el efecto de la lámina (MY o MY/AL) las curvas son cercanas bajo un mismo tipo de convección, es decir los tratamientos con convección forzada (FC-MY y FC-MY/AL) fueron similares entre sí, al igual que en el análisis de las temperaturas, así como las corridas con convección natural (NC-MY y NC-MY/AL), aunque no así en el análisis de temperatura. No obstante, entre los dos grupos hay diferencia notoria. Estos resultados se verifican con el ANOVA, donde el tipo de convección y la interacción de ambos factores tienen significancia sobre el contenido de humedad del producto ($p < 0.05$) mientras que el tipo de lámina, individualmente no tiene efecto significativo.

La tendencia mostrada por la Figura 3.8 sugiere que el secado con convección forzada es mejor que con convección natural. Es claro que el fenómeno está limitado por la transferencia de masa en la superficie de la muestra, una vez esté garantizada la temperatura necesaria para

la evaporación del agua. La mayor pérdida de humedad ocurre debido al mayor coeficiente convectivo de transferencia de masa del aire forzado comparado con aire natural que depende del gradiente de concentración de agua entre el alimento y el aire y la velocidad a la que éste arrastra la humedad. Sin embargo, estos datos de humedad indican que no hay diferencia entre secar con Mylar™ o con Mylar™-papel aluminio, especialmente para las corridas con convección forzada.

La similitud de las curvas con convección natural (NC-MY y NC-MY/AL) es únicamente en la primera etapa del secado. Después de 3h las curvas se empiezan a separar. En la segunda mitad, cuando disminuye la disponibilidad de agua es probable que el fenómeno controlante sea la transferencia de calor dentro de la muestra, además la interacción entre los factores hacia el final del secado puede tener mayor importancia haciendo que sea mejor el secado con MY/AL (a pesar de esto en 5h de exposición se alcanzaron contenidos de humedad todavía muy altos 61.04 ± 0.7 % bh).

Altas temperaturas registradas por un producto sometido a cualquier tipo de secado no debe suponer una mayor pérdida de humedad puesto que son transferencias diferentes. En efecto, las temperaturas más altas corresponden a los tratamientos con menor tasa de secado (convección natural). Se cree que la energía disponible para el secado con convección natural se gasta en subir la temperatura de la muestra, mientras en los otros casos (convección forzada), se gasta principalmente en evaporar el agua. En otras palabras, la temperatura sube debido a la limitación de transferencia de masa por los gradientes bajos de humedad entre el aire y la muestra.

Como ya se dijo, la interacción entre factores y la intervención de las diferentes formas de transmitir el calor se reflejan en los resultados de este estudio. Al analizar los resultados de humedad empleando el mismo tipo de lámina, el secado RW en la corrida NC-MY es lento y poco viable comparado con el tratamiento FC-MY porque las características del aire afectan al primero negativamente, mientras que en el segundo, el aire forzado no sólo mantiene en niveles moderados las temperaturas de la muestra, como se mostró en la sección 3.1.5.1, sino

que provee los más bajos contenidos de humedad porque hay mayor arrastre de agua. El mismo comportamiento se observó en el hidrosecado conductivo, siendo mejor el tratamiento FC-MY/AL que el NC-MY/AL.

La energía total aprovechable proveniente del agua caliente en el secado RW (FC-MY) se gasta principalmente en el intercambio de masa y calor durante la evaporación del agua de la muestra. Al cubrir la lámina con papel aluminio (FC-MY/AL), no sólo se cierra el paso de la energía radiante sino que se aumenta la resistencia a la transferencia de calor y el secado se vuelve netamente conductivo. Sin embargo, este efecto lo hace comparable con el secado RW (FC-MY) porque el papel aluminio actúa como un aislante impidiendo el sobrecalentamiento de las muestras las cuales son similares en tamaño, forma, color y apariencia después del secado. Además, las curvas de secado de estos dos tratamientos son semejantes y mejores que las de los tratamientos con convección natural. Como se observó, estos últimos son comparables en términos de humedad pero no en temperatura porque hay alta interacción entre los factores analizados.

La película plástica transparente a la radiación infrarroja permite la transmisión de energía radiante hasta las moléculas de agua del alimento promoviendo su evaporación y es más que compensada por la baja conductividad térmica del plástico (0.15-0.24 W/m K) para mantener la muestra a temperaturas moderadas. La conveniencia de ésta técnica sugiere mayores tasas de secado y menores temperaturas mejorando o haciendo comparables con otras técnicas, las características resultantes de calidad (Abonyi et al., 1999; Nindo et al., 2003b; Cadwallader et al., 2010; Abul-Fadl y Ghanem, 2011; Topuz et al., 2009 y 2011; Nayak et al., 2011; Ochoa et al., 2012; Capariño et al., 2012 y Kaspar et al., 2012), aunque como se observó, el método se favorece cuando las muestras se exponen a aire forzado. Lo anterior confirma la hipótesis de que el secado RW es un método principalmente conductivo, gobernado por la transferencia de calor durante el calentamiento inicial y luego por la transferencia de masa durante la evaporación de la humedad.

3.1.6 Conclusiones

Las temperaturas promedio medidas en los tres niveles de espesor de las muestras fueron mayores en las corridas con convección natural (NC-MY y NC-MY/AL) y menores en las de convección forzada (FC-MY y FC-MY/AL) lo cual está íntimamente relacionado con los resultados de las curvas de secado. Con las primeras se obtuvieron las cinéticas de humedad más bajas, mientras que con las segundas se encontraron las más altas. Esto hace que los tratamientos FC-MY y FC-MY/AL sean comparables y también viables en cuanto a condiciones finales de secado. Se demostró la hipótesis de que al obstruir el paso de la radiación infrarroja con papel aluminio, el aprovechamiento del calor proporcionado por el agua es mayor, pero la interacción entre factores y principalmente la convección, conducen a equilibrar las curvas de secado y los métodos se vuelven comparables. Lo anterior comprueba que el secado RW es principalmente un método conductivo. En términos de eficiencia energética, el tratamiento FC-MY/AL (denominado hidrosecado conductivo) es el mejor según el análisis del aprovechamiento de la energía disponible.

3.2 RADIACIÓN GLOBAL EN EL SECADO RW

3.2.1 Introducción

Considerando el secado RW como un proceso combinado de energía IR y conducción de calor, en vista de la falta de documentación y estudio, el entendimiento del fenómeno radiante es indispensable. No obstante, la transferencia de calor y masa durante el secado de alimentos con energía infrarroja no está bien descrita en la literatura.

La energía de radiación es absorbida por la capa de la superficie y se convierte en calor. En cuerpos húmedos como los alimentos, la temperatura más alta se produce en la capa de superficie irradiada y depende del coeficiente de extinción. Por lo tanto, el flujo de calor generado en una capa debajo de la superficie irradiada es conducido hacia el centro del cuerpo, así como a su superficie y, dependiendo de su magnitud, la humedad interna migra a la superficie a diferentes tasas. El calor de la superficie al aire circundante se transfiere por convección. Cuando se permite una temperatura superior (mayor flujo de calor radiante) en

la superficie del producto, el contenido de humedad de las muestras se reduce a un ritmo mayor (Chua et al., 2004).

Para potenciar su efecto en el procesamiento de alimentos, una nueva modalidad es la aplicación combinada de radiación electromagnética y otras formas de secado (Hebbbar et al., 2004). La combinación de infrarrojo con aire caliente proporciona un efecto sinérgico, dando como resultado un proceso de secado eficiente. Por ejemplo, Datta y Ni (2002) estudiaron la aplicación de infrarrojo, microondas y aire caliente individualmente y combinados para secar materiales. El rápido calentamiento del material por energía electromagnética aumenta la velocidad de movimiento de la humedad hacia la superficie. El flujo convectivo de aire elimina la humedad de la superficie, además de bajar su temperatura, lo que resulta en un aumento de la transferencia de masa. Se cree que esta sinergia es similar a la que ocurre en el secado RW como se mostró en los resultados anteriores.

Según Hebbbar et al. (2004), la eficacia de cualquier sistema de calentamiento basado en infrarrojo depende principalmente del tipo de fuente de calor utilizado. Dado que la energía infrarroja se convierte en calor, sólo cuando el material absorbe la radiación, es esencial seleccionar una fuente de calor que emita radiación en el rango en el que el material a procesar tiene una absorción máxima. Los estudios sobre la absorción de la radiación infrarroja por los productos alimenticios han demostrado que muestran una fuerte absorción en el rango de 2.5-3.0 μm (Sandu, 1986). El secado RW se ha fundamentado en que una absorción máxima de radiación IR de las muestras ocurre en los picos de máxima transmisión del MylarTM en 3.0, 4.7 y 6.0 μm (Nindo y Tang, 2007), contradiciendo lo expuesto por Sandu (1986). El objetivo de esta sección es conocer magnitudes aproximadas de radiación global medida muy cerca de muestras delgadas de zapallo secadas mediante RW y analizar su comportamiento en el tiempo de secado.

3.2.2 Materiales y métodos

Debido a que aún es desconocida la cantidad de radiación asociada al proceso de secado RW, se diseñaron una serie de experimentos preliminares para medirla. Se hicieron pruebas para

detectar la cantidad de radiación global superficial en muestras secadas por RW. La radiación global corresponde a todas las formas de radiación en el rango espectral 0.25-11 μm cubriendo las regiones ultravioleta-visible (0.2-0.75 μm) e infrarrojo cercano NIR, infrarrojo medio MIR y parte del infrarrojo lejano (0.75-11 μm). Se utilizó el potenciómetro láser PowerMaxTM modelo 5200 (marca Molelectron Detector Inc.) con detección en el rango espectral 0.25-11 μm . Consta de un medidor análogo que contiene el sensor láser y una pantalla digital de datos de tres dígitos en el rango de 30 mW-10 kW. La precisión del dispositivo es de $\pm 3\%$ (Molelectron, 1993).

En todos los experimentos, el medidor se dispuso a una distancia promedio de 1 cm por encima de las muestras (o de la superficie del baño), y se realizaron mediciones en seis (6) puntos sobre el área de secado con el fin de tomar el promedio aritmético de las mismas. La radiación promedio (en W) se dividió por el área circular del detector ($A_d = 2.35 \times 10^{-4} \text{ m}^2$) para obtener el flujo de calor radiante (W/m^2). La Figura 3.9 contiene imágenes del potenciómetro.



Figura 3.9. Medición de la radiación global de muestras delgadas de zapallo sobre lámina de Mylar

Antes de las pruebas de secado se realizaron mediciones de la radiación emitida desde la superficie del agua a diferentes niveles, desde el fondo hasta el tope del baño termostático. También se registró la radiación por encima del baño cubierto con una membrana plástica únicamente. Con el fin de comparar los resultados se utilizaron membranas de MylarTM y de

plástico estirable y transparente para conservar alimentos elaborado de polietileno de baja densidad (LDPE) (ver Figura 3.9).

Para los experimentos de secado se utilizaron láminas rectangulares de zapallo de 1.5 mm de espesor con un contenido de sólidos solubles de 5.2°Brix, y un contenido de humedad de 93.5 % (bh). El equipo de secado RW consta del baño termostático mencionado lleno con agua del grifo, el cual se cubrió con la membrana de plástico (Mylar™ o LDPE) que está en contacto con el agua y sobre la cual se dispusieron las muestras. La temperatura del baño se acondicionó a $90 \pm 5^\circ\text{C}$ y las condiciones del laboratorio fueron 24°C y 73% HR. También se evaluó la pérdida de peso en el tiempo a intervalos de 10 min empleando una balanza digital (marca Ohaus® Adventurer™) con una precisión de 0.01 g.

3.2.3 Resultados y discusión

La pérdida de peso de las rodajas de zapallo durante los tratamientos con lámina de Mylar™ y LDPE se muestra en la Figura 3.10. Se evidencia que la velocidad de secado sobre LDPE es mayor que sobre Mylar™. Por esa razón, el tiempo aparente de secado con LDPE fue menor alcanzando valores de humedad constante a 50 min, mientras que en el secado con Mylar™ se alcanzó a 70 min. Sin embargo, a pesar de presentar mayor pérdida de humedad y menor tiempo de secado, las muestras sobre LDPE experimentaron mayor degradación por su evidente cambio de aspecto y color como producto de su elevada resecación (ver Figura 3.11).

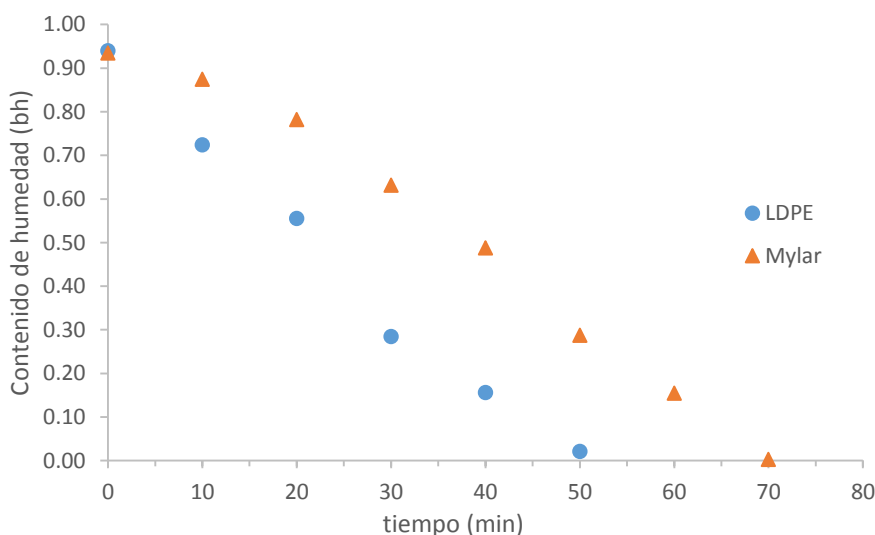


Figura 3.10. Curvas de secado RW de rodajas delgadas de zapallo sobre diferentes membranas



Figura 3.11. Rodajas de zapallo en diferentes instantes del secado sobre LDPE (Polietileno de baja densidad)

El comportamiento de la radiación global medida cada 10 minutos durante 3.3 h (200 min) se presenta en la Figura 3.12. Se observa la diferencia que resulta de utilizar una u otra lámina de plástico. Los valores más altos de flujo de calor global se obtuvieron con LDPE, superando notoriamente a los obtenidos con MylarTM. Aunque la diferencia es alta al principio, ésta se va reduciendo hacia el final del tiempo de exposición. En ambos casos, es evidente una tendencia ascendente durante aproximadamente la primera hora de exposición pero luego se estabiliza alrededor de 213 W/m^2 para LDPE y 188 W/m^2 para el MylarTM. Estos valores coinciden con el tiempo en que se alcanzó el mínimo de humedad (en cada caso), como se observó en la Figura 3.10.

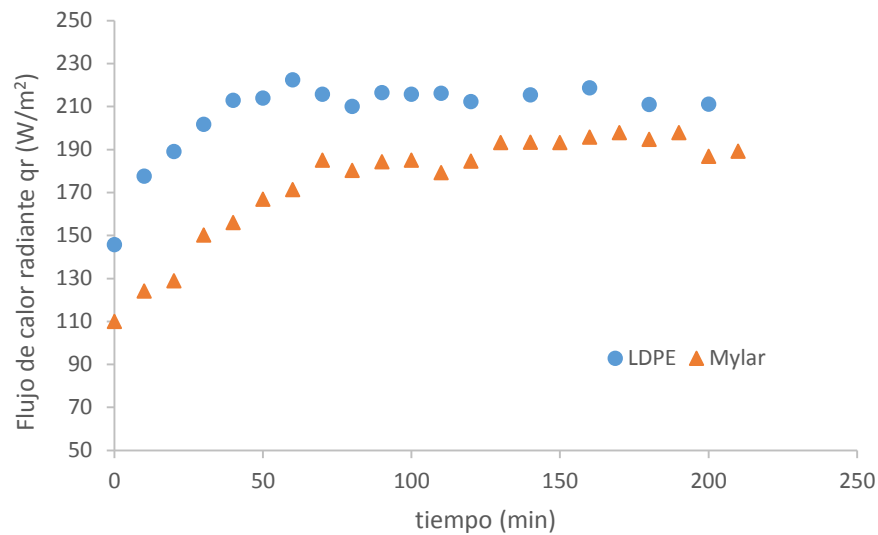


Figura 3.12. Evolución de flujo de calor radiante global durante el secado RW con diferentes láminas de plástico

Teóricamente, a medida que prosigue el secado aumentan las reflexiones desde el material y disminuye la refracción (absorción mas transmisión). Sin embargo, la Figura 3.12 muestra que durante todo el tiempo de secado el flujo de calor radiante es ascendente; entonces es posible que haya igual refracción pero repartida en porciones diferentes (mayor transmisión y menor absorción). Cuando ya no hay humedad en el material y el secado ha terminado, todo se transmite y nada se absorbe, por eso toma un valor constante la lectura del potenciómetro.

Otra posible explicacion es que idealmente se puede asumir el alimento como un cuerpo negro como si toda la radiación incidente se absorbiera en su superficie y no reflejara o transmitiera porción alguna. Esto puede aplicarse a las muestras de zapallo analizadas debido a su muy bajo espesor, entonces la radiación detectada por el sensor se debe posiblemente a que toda la energía absorbida es emitida desde la superficie en todas las direcciones y a todas las longitudes de onda (Ratti y Mujumdar, 1995). Esta energía emitida depende únicamente de la temperatura de las muestras y de las características de su superficie. No obstante, esto necesita investigarse más.

Una vez terminado el secado, las muestras de ambos tratamientos aparentemente están en una condición similar y por ello el flujo de calor tiende a tomar valores muy cercanos. Aunque no es posible determinar cuanta radiación de la detectada es por infrarrojo, los valores globales obtenidos para el secado RW (MylarTM) son bajos (aumentan desde 109 hasta 185 W/m² en 70 min) comparados con los obtenidos con LDPE (desde 145 hasta 213 W/m² en 50 min). Esto refuerza análisis previos indicando que hay materiales poliméricos con mejores propiedades ópticas que el MylarTM, aunque en este caso el LDPE no es el más adecuado por la desecación que provoca en las muestras.

Adicionalmente se realizaron dos mediciones antes del secado. La primera con el baño lleno de agua caliente al tope pero sin membrana y la segunda con el baño de agua al máximo cubierto por la membrana de secado según cada caso. Los resultados indicaron que al poner la lámina de LDPE, la radiación detectada por el dispositivo (258.5 W/m²) es ligeramente menor que en el estado inicial (281.12 W/m²) y por el contrario al poner el MylarTM la detección disminuye casi 44 % (158.9 W/m²). Luego, ésta radiación presenta una importante disminución en el caso de LDPE y una leve disminución en el MylarTM por la alta y baja formación de burbujas y vapor de agua bajo la membrana, respectivamente, que impiden el paso de la radiación. En ambos casos, sólo la radiación vuelve a incrementarse cuando se ponen las muestras húmedas sobre la membrana. La radiación observada sobre el LDPE se entiende como la alta capacidad de transmisión detectada por el potenciómetro a las condiciones dadas del agua, pero en el caso del MylarTM la importante disminución del valor detectado pareciera que en lugar de transmitirse radiación, ésta se absorbiera por el material.

3.2.4 Conclusiones

En resumen, la radiación absorbida y transmitida (refractada) por las muestras secadas sobre MylarTM es menor que en las secadas sobre LDPE. Este último por sus características es aparentemente transparente no sólo a la radiación visible sino a la IR. Tal como lo afirma la teoría del secado RW, hay incidencia de la radiación IR. Cuando el alimento está dispuesto en la membrana hay alta absorción y baja transmisión pero esta proporción va cambiando a medida que se va secando. Diversos materiales poliméricos transparentes a la radiación

infrarroja pueden servir como membrana de secado RW, sin embargo no todos proveen las mejores características de calidad del producto final.

4. MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL SECADO RW

4.1 INTRODUCCIÓN

Un modelo matemático es una analogía matemática de la realidad física, que describe las propiedades y características de un sistema real en términos de variables matemáticas y operaciones. Existen muchas clases de modelos, entre ellos están los modelos basados en la física. El punto de partida para estos modelos son las leyes físicas universales que deben describir los fenómenos físicos que se presume. Se validan con datos experimentales, pero éstos no necesariamente tienen que existir antes de la modelación (Sablani et al., 2007).

Actualmente, los modelos basados en la física son poco comunes en los alimentos y en bioprocesos. Esto se puede atribuir principalmente a la variabilidad en los biomateriales y a las complejidades de las transformaciones que los alimentos y los biomateriales se someten durante el procesamiento. Sin embargo, este escenario está cambiando a medida que se desarrollan las herramientas computacionales adecuadas. De hecho, el modelo basado en la física (por ejemplo, la dinámica de fluidos computacional, o CFD) es una de las áreas de ingeniería de procesos de alimentos que experimentan un rápido crecimiento.

En general, los modelos matemáticos son muy útiles en el diseño y análisis de procesos de secado de alimentos con transferencia simultánea de humedad y calor. Estos pueden dividirse en tres grandes grupos: (i) aquellos que involucran ecuaciones empíricas válidas para procesos específicos; (ii) aquellos basados en modelos básicos de difusión de masa y calor, y (iii) un grupo de modelos más exhaustivos que asocia ecuaciones de transporte de energía, masa y momento con todos los flujos interactuando termodinámicamente. Una práctica común es el modelado del material porque es posible predecir la distribución de temperatura y humedad instantánea dentro del mismo. Muchos modelos de transferencia simultánea de masa y calor en procesos de secado de frutas y vegetales se han reportado (Kozempel et al., 1986; Wang y Brennan, 1995; Hernández et al., 2000; Pavón-Melendez et al., 2002; Datta y

Ni, 2002; Ruiz-López et al., 2004; Aversa et al., 2007; Barati y Esfahani, 2010; y Halder et al., 2011).

4.2 MODELO PRELIMINAR BASADO EN EL SECADO EN TAMBOR

Las ecuaciones que gobiernan un modelo de transporte describen los fenómenos físicos que ocurren en el interior del dominio de solución. Las condiciones de frontera son una parte integral del modelo y son tan importantes como las ecuaciones que lo gobiernan. Diversos procesos térmicos de alimentos pueden modelarse utilizando el mismo conjunto de ecuaciones gobernantes pero variando las condiciones límite (Halder y Datta, 2012).

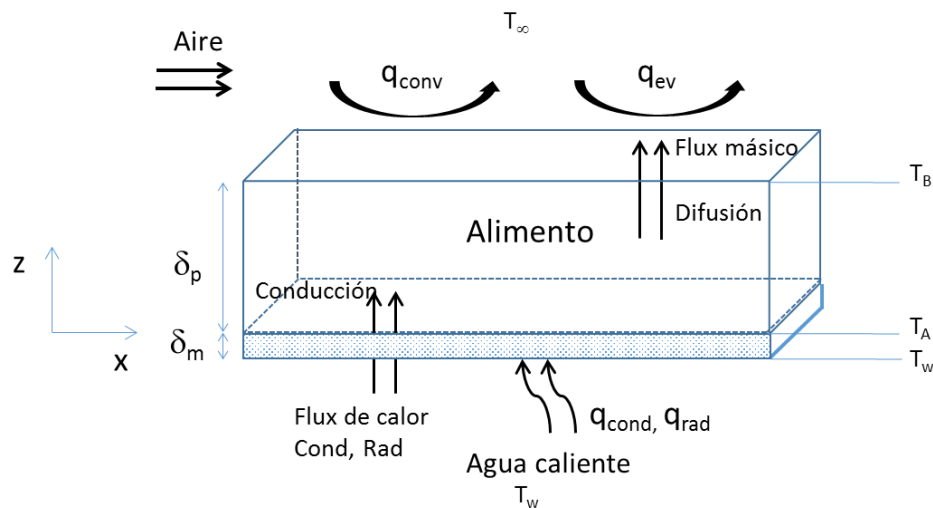


Figura 4.1. Representación del volumen de control para el análisis matemático

Teniendo en cuenta el análisis del capítulo 2, un esquema del volumen de control del sistema considerado se presenta en la Figura 4.1. Nindo y Tang (2007) sugirieron que el modelo unificado presentado por Konovalov et al. (2002) para el secado de purés o suspensiones de diversos materiales describe comportamientos que son comparables con algunos observados en el secado RW. La siguiente es una aproximación matemática simple de la transferencia de calor y humedad durante el secado de un sólido en forma de lámina rectangular como el mostrado en la Figura 4.1. El modelo matemático que se describe está basado en

modelaciones de sistemas de secado en tambor (Kozempel et al., 1986; Abchir et al., 1988; Trystam y Vasseur, 1992) pero puede ser ajustable al secado RW.

Se plantearon las siguientes suposiciones: (1) el encogimiento es despreciable; (2) las propiedades físicas y térmicas se consideran constantes; (3) el flujo de vapor de agua dentro del alimento durante el secado se considera despreciable; (4) la muestra se asume como una lámina rectangular infinita (5) el flujo de masa y calor es unidimensional, perpendicular a la superficie en contacto con la pared del secador (dirección “z”).

4.2.1 Ecuaciones generales y condiciones de frontera

Asumiendo que la segunda Ley de Fick es aplicable a los mecanismos de transferencia de masa, un balance de masa sobre el elemento diferencial de volumen de espesor “ dz ”, conduce a la ecuación diferencial para la transferencia del agua líquida:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial X}{\partial z} \right) \quad (4.1)$$

donde, X es el contenido de humedad en base seca (adim.), D es el coeficiente de difusión de masa efectivo (m^2/s) y z es la posición dentro de la rodaja.

Suponiendo que la transferencia de calor es sólo por conducción a través del sólido, un balance de calor basado en la segunda ley de Fourier conduce a:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (4.2)$$

donde, ρ es la densidad (kg/m^3), C_p es el calor específico ($J/kg \text{ K}$), T es la temperatura (K), t es el tiempo (s), y k es la conductividad térmica ($W/m \text{ K}$).

Asumiendo que el trozo de material se mantiene en continuo contacto con la superficie del secador, y sin distorsión alguna durante el tiempo de secado, las condiciones iniciales y de frontera para el balance de masa (Ec. (4.1)) son:

$$\text{En el tiempo} \quad t = 0, \quad X = X_0 \quad (4.3)$$

$$\text{En la superficie inferior (A)} \quad z = 0, \quad \frac{\partial X}{\partial z} = 0 \quad (4.4)$$

$$\text{En la superficie superior (B)} \quad z = \delta_p, \quad D \left(\frac{\partial X}{\partial z} \right) = k_x (X_B - X_{\infty B}) \quad (4.5)$$

De igual forma para el balance de calor (Ec. (4.2)), las condiciones iniciales y de frontera son, respectivamente:

$$\text{En el tiempo} \quad t = 0, \quad T = T_0 \quad (4.6)$$

$$\text{En la superficie inferior (A)} \quad z = 0 \quad k \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{k}{\delta_m} (T_w - T_A) + q_r \quad (4.7)$$

$$\text{En la superficie superior (B)} \quad z = \delta_p \quad k \frac{\partial T}{\partial z} = h(T_B - T_{\infty B}) + M_{ws} \lambda_w \quad (4.8)$$

Los coeficientes de transferencia de masa (k_x) y de calor (h) del vapor en el aire se pueden calcular usando las analogías de Chilton y Colburn (Perry y Green, 1997, Bird et al., 1984). Los subíndices (m) y (w) significan membrana y agua, respectivamente. El segundo término de la derecha en la Ec. (4.8) es la cantidad de calor requerida para evaporar el flujo de humedad líquida en la superficie superior, donde M_{ws} es la tasa de agua evaporada en la superficie ($\text{mol/m}^2 \text{ s}$) y λ_w es el calor latente de vaporización (J/mol).

4.2.2 Modelo agrupado

Una solución analítica podría resolver el problema pero implica mayor esfuerzo por lo que generalmente este tipo de problemas se resuelve mediante simulación numérica (Kozempel et al., 1986; Trystram y Vasseur, 1992; Kostoglou y Karapantsios, 2003; Raisul Islam et al., 2007). Una versión del modelo matemático expresado en parámetros agrupados reduciría el problema. En lugar de resolver un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales (EDP), el modelo se reduce a la solución de un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias (EDO).

El método de la resistencia interna despreciable (método de parámetros agrupados) se emplea en la simulación actual (Aversa et al., 2007; Barati y Esfahani, 2010). Es importante resaltar que este método es aceptable cuando el gradiente de temperatura (o de humedad) dentro del alimento puede ser considerado como despreciable. Pavón-Meléndez et al. (2002) informaron que la temperatura interna de los alimentos es aproximadamente igual a la

temperatura de la superficie cuando el número de Biot es alrededor de 1. Considerando un gradiente de temperatura (o de humedad) insignificante se obtiene un modelado matemático simple en comparación con la ecuación de transferencia de calor (o de masa) distribuida espacialmente. En el caso de la superficie de la lámina expuesta a intercambio con el aire, el modelo puede escribirse como:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = k_x(X_B - X_{\infty B}) \quad (4.9)$$

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = h(T_B - T_{\infty B}) + M_{ws} \lambda_w \quad (4.10)$$

Desarrollar un modelo matemático para el sistema de secado RW como una herramienta para mejorar el conocimiento de los fenómenos que ocurren y llevar a cabo su optimización se ha convertido en una necesidad; primero se debe resolver el problema de identificación y validación del modelo y luego la simulación numérica de los resultados. El conocimiento basado en aproximaciones y resultados de experimentación da lugar al planteamiento de un modelo matemático con simplificaciones que se analizan en la siguiente sección.

4.3 MODELO MATEMÁTICO DEL SISTEMA RW

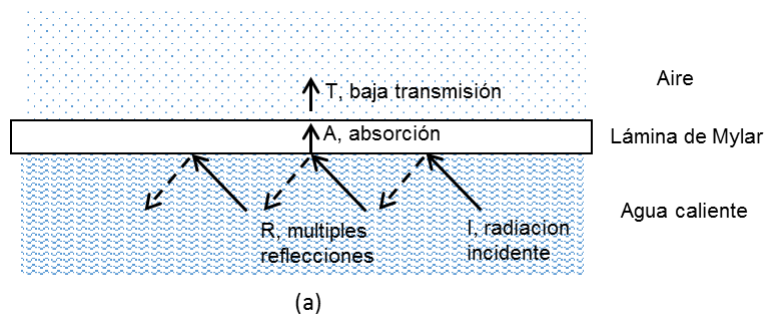
4.3.1 Aproximaciones y cálculos preliminares

Algunas de las consideraciones sobre el sistema físico del secado RW en términos de transferencia de masa y calor no se han mencionado en estudios anteriores. El siguiente enfoque incluye algunas de las observaciones que se generaron durante el análisis y experimentación del presente estudio. Para el análisis se contempló un sistema estático de secado RW para deshidratar trozos pequeños de un alimento húmedo (paralelepípedo). Para estudiar la transferencia de calor y de masa desde los perfiles de temperatura y humedad, se consideraron muestras de aproximadamente 1 cm de espesor.

4.3.1.1 Acerca de la radiación

Con base en la teoría de secado RW, se podrían distinguir tres etapas en el proceso. En la primera etapa, hay tres medios de abajo hacia arriba: agua (η_0), MylarTM (η_1) y aire (η_2), donde η es el índice de refracción de cada medio. En este punto, el flujo de calor proporcionado por el agua caliente es básicamente por convección y radiación, la energía radiante infrarroja es bloqueada por la presencia de la membrana de MylarTM produciendo múltiples reflexiones entonces, la radiación se refracta al aire y la transferencia de calor en la membrana es por conducción únicamente.

En la segunda etapa, los tres medios son: agua (η_0), MylarTM (η_1) y producto (η_3), puesto que los materiales alimenticios pueden contener una humedad mayor de 90%, entonces se puede decir que $\eta_0 = \eta_3$. La pérdida de calor por convección y radiación desde el agua caliente se transfiere por conducción y radiación a través de la hoja de MylarTM porque este material polimérico se considera transparente a la radiación IR. Este calor radiante penetra en las gotas de agua del material, que proporciona ventanas de oportunidad para la energía IR. En otras palabras, el calor radiante se transfiere como si no hubiera membrana presente y se absorbe en el material. Sin embargo, la muestra también se deshidrata por calor conductivo. Las etapas 1 y 2 se pueden observar en la Figura 4.2. En la última etapa, existen tres medios de abajo hacia arriba (muy similar al caso 1): agua, MylarTM, y aire. La fuente de calor (agua caliente) está bloqueada de nuevo por la presencia del material seco dispuesto encima de la película de MylarTM. Al no encontrar agua en el alimento, y en presencia únicamente de conducción, el secado se da por terminado. Las muestras deben ser retiradas para evitar la desecación excesiva.



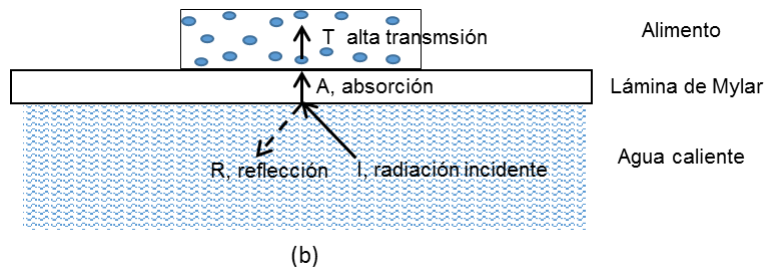


Figura 4.2. Representación de la radiación durante el secado RW en dos extremos: (a) agua-MylarTM-aire y (b) agua- MylarTM-alimento

De acuerdo con la discusión de la sección 2.2.2, hay algunas discrepancias en las diferentes propiedades ópticas del MylarTM reportadas en la literatura. Para investigar esto es necesario considerar dos de las tres etapas físicas descritas anteriormente para reflectividades máximas y mínimas según los dos escenarios mostrados en la Figura 4.2: la interfase MylarTM-aire (no hay material sobre la membrana de secado) y la interfase MylarTM - agua (el producto húmedo está sobre la lámina suponiendo que el producto es casi agua), respectivamente. Este análisis condujo a hacer cálculos de la transmisividad del MylarTM a partir de las propiedades ópticas en el rango de longitudes de onda de 0-10 μm , ya que esta gama cubre los picos de alta absorción de agua (3, 4.7 y 6 μm) en el espectro infrarrojo. Para los cálculos que siguen, se contactó directamente a Dupont Teijin Films quienes fabrican las películas de MylarTM (Tech Service Hopewell, Tech-Service.Hopewell@usa.dupont.com), quienes proporcionaron el coeficiente de absorción (K) del MylarTM a diferentes longitudes de onda.

La transmisividad espectral (τ_λ) se obtuvo utilizando el balance de energía que conduce a la relación bien conocida (Siegel y Howell, 2002):

$$\rho_\lambda + \alpha_\lambda + \tau_\lambda = 1 \quad (4.11)$$

La reflectividad espectral (ρ_λ) se puede calcular a partir de la teoría electromagnética clásica usando el índice de refracción (η) de cada medio participante y para ambas interfaces MylarTM-aire y MylarTM-agua mediante la Ec. (4.12) (Siegel and Howell, 2002). La

absortividad espectral (α_λ) se obtuvo aplicando la Ley de Beer a través de los coeficientes de absorción del plástico, de acuerdo con la Ec. (4.13) (Almeida et al., 2006).

$$\rho_\lambda = \left(\frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} \right)^2 \quad (4.12)$$

$$1 - \frac{\alpha_\lambda}{(1 - \rho_\lambda)} = \exp(-K\delta_m) \quad (4.13)$$

donde, K es el coeficiente de absorción del MylarTM a cada longitud de onda y δ_m es el espesor del MylarTM. Para efecto de cálculos, la reflectividad espectral puede asumirse constante en el rango de longitud de onda considerado (Adamov and Savinich, 1979).

Además, asumiendo que la membrana de MylarTM es un cuerpo negro, la longitud de onda λ_{\max} a la cual su intensidad radiante es un máximo a la temperatura de la fuente (agua caliente a 90°C) se calculó de acuerdo con una forma aproximada de la distribución de Planck, la cual es conocida como la Ley de desplazamiento de Wien (Siegel & Howell, 2002):

$$\lambda_{\max} = \frac{2897.8 (\mu m K)}{T(K)} \quad (4.14)$$

Con la Ec. (4.14), se obtuvo un valor máximo de 7.98 μm . La transmisividad del MylarTM a diferentes longitudes de onda se puede observar en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Transmisividad del MylarTM en las longitudes de onda de alta absorción del agua calculada con la Ec. (4.11).

Longitud de onda, λ (μm)	Transmisividad Espectral, τ (%)	
	Aire-Mylar TM	Agua-Mylar TM
3	4.5	9.2
4.7	14.8	19.4
6	3.4	8.1
~8 (max)	0	0

Estos datos son consistentes con los reportados en la literatura (Tsilingris et al., 2010) y fueron validados con cálculos posteriores. Sin embargo, son menores que los reportados en

la mayoría de espectros de transmisión para el Mylar™ (transmisividad alrededor de 90%). Además, la intensidad máxima de radiación térmica se ha de esperar a 8 μm, pero en ese punto la transmisión del Mylar™ es nula. Dada la inconsistencia entre los datos publicados (por razones desconocidas), se considera que existe una falsa expectativa ante la afirmación de que el Mylar™ es un material polimérico altamente transparente a la radiación IR. Las mediciones de radiación global con el potenciómetro descritas en el capítulo anterior indican que en efecto el Mylar™ transmite radiación sin embargo hasta el momento no se conoce la porción de ésta en el espectro IR.

4.3.1.2 Acerca del flux de calor

Por otra parte, analizando los perfiles de temperatura durante el secado RW (datos provenientes de la literatura y obtenidos en este estudio) se pudo notar que una muestra húmeda necesita un suministro constante de energía para calentarse lo suficiente dado el rápido calentamiento observado en los primeros minutos (o segundos) de operación. En este estudio, los trozos de zapallo de 1 cm de espesor requirieron 15 min aproximadamente para calentarse desde 0 hasta 62°C (temperatura máxima que alcanza la zona inferior del producto). Esto implica la necesidad de un calentamiento superficial de la muestra que está en contacto con la película de Mylar™. El calor de superficie q_s'' asegura el calentamiento inicial para dar lugar a la evaporación de la humedad y se puede obtener por solución del perfil de temperatura para cuerpos semi- infinitos dado por la Ec. (4.15) (Datta, 2002).

$$T - T_i = \frac{2}{k} q_s'' \left(\frac{\alpha t}{\pi} \right)^{1/2} \quad (4.15)$$

donde, T a condiciones iniciales es $T(t = 0) = T_i$, q_s'' es el flux de calor en la superficie (W/m^2), α es la difusividad térmica del alimento (m^2/s), k es la conductividad térmica del alimento ($W/m K$) y t es el tiempo (s).

Debido a la evaporación, el calentamiento se minimiza y la temperatura se estabiliza rápidamente (unos 30°C por debajo del agua del baño en el fondo de la muestra). Un

comportamiento similar se observó en la superficie de la muestra. El flujo de calor a través de la lámina de MylarTM, q_m se calculó como la suma del flux de calor conductivo y el calor radiante según la Ec. (4.18); el flux del calor radiante $q_{r,m}$ se calculó con la Ec. (4.17) (Incropera y De Witt, 1999) y se consideraron los datos de la Tabla 4.1 (donde, I_λ es el flujo de calor radiante incidente desde la fuente calculado como $q = \varepsilon \sigma T^4$ a las condiciones del agua caliente). El flujo $q_{r,m}$, fue de 86 W/m², el cual representa alrededor del 15% del flux de calor total a través del MylarTM. El flujo de calor conductivo $q_{k,m}$ (480 W/m², Ec. (4.16)) fue cinco veces mayor que el flujo de calor radiante, $q_{r,m}$. Si se observa, el valor calculado de $q_{r,m}$ es menor que el valor obtenido experimentalmente en la sección 3.2.2, lo cual era de esperarse teniendo en cuenta que los registros del potenciómetro son valores globales y no de energía infrarroja neta. Por último, el flujo de calor q_m demostró ser suficiente para mantener el secado de las muestras hasta humedad constante, por eso se utilizó como condición de frontera en las simulaciones.

$$q_{k,m} = \frac{k}{l} (T_1 - T_2) \quad (4.16)$$

$$q_{r,m} = \tau_\lambda I_\lambda = (1 - \rho_\lambda - \alpha_\lambda) I_\lambda \quad (4.17)$$

$$q_m = q_{k,m} + q_{r,m} \quad (4.18)$$

donde, T_1 y T_2 son las temperaturas en la superficie inferior y superior del MylarTM, respectivamente.

Lo anterior indica que después del intenso calentamiento, el proceso es principalmente conductivo y es posible que la ventana de refractancia contribuya a incrementar rápidamente la temperatura del producto pero debido a la alta evaporación experimentada por el producto, la ventana se cierra y la radiación se refleja hacia el agua, entonces el proceso continúa por transferencia de calor conductivo. De acuerdo con Konovalov et al. (2004), el secado por contacto directo involucra conducción y esto es ventajoso porque la intensidad de la transferencia de calor es muy alta (diez veces más alta en comparación con un secado convectivo).

Algunos resultados de secado infrarrojo, calentamiento con microondas (MW) o procesos combinados exhiben un perfil de temperatura similar al comportamiento observado para el secado RW (Salagnac et al., 2004, Nowak y Lewicki, 2004; Swasdisevi et al., 2009). Al comienzo, se observa un incremento en la temperatura del material hasta alcanzar un valor máximo, seguido de una estabilización de temperatura. Una posible explicación a este fenómeno el cual es común en muchos tipos de secado es la diferencia entre la temperatura de bulbo seco del aire y la de bulbo húmedo de la superficie del producto. Este factor determina en forma crítica la tasa de secado y es conocida como “depresión de bulbo húmedo” (Brennan, 2006).

4.3.1.3 Acerca de la geometría

Otra consideración es la probabilidad de que la evaporación ocurra no sólo en la superficie superior de las muestras sino en todas las superficies debido a la geometría misma de las muestras (paralelepípedos). Debido a las observaciones experimentales, se puede considerar que hay una milimétrica capa de aire circulando entre la lámina de MylarTM y la parte inferior del producto debido al progresivo levantamiento de las muestras desde los extremos hacia al centro, lo cual es atribuido a la geometría escogida, al espesor y al encogimiento, pero esto necesita investigarse más a fondo.

Como se mencionó en la sección 2.2.3, el efecto del espesor de las muestras afecta el secado especialmente si este incluye alguna forma de radiación. Por tal razón y propósitos prácticos se considera que toda la radiación es absorbida solamente en la superficie que está expuesta a la radiación (profundidad de penetración cero) (Datta, 2007). En el sistema RW, la máxima longitud de onda a la que la muestra húmeda absorbe como un cuerpo negro es 8 μm (a 90°C), cubriendo las regiones del infrarrojo cercano (NIR) y del infrarrojo medio (MIR). Debido a que las bandas máximas de absorción del agua líquida están localizadas en el MIR y la cantidad de radiación no se modifica desde la fuente ya que opera a una temperatura fija por debajo del punto de ebullición del agua, la influencia de la radiación MIR en el secado RW no sería suficiente para secar materiales de espesor alto (mayor a 3 mm). Es probable que muy pequeñas cantidades de energía penetren y casi toda la energía se convierta en calor en

la superficie del alimento (Krishnamurthy et al., 2008) lo cual se confirmó por el cálculo q_s'' a partir de la Ec. (4.15).

Se simuló un modelo en 2D para la transferencia de calor a través del material alimenticio; los flujos de calor conductivo y radiante se suministran como un término de flujo límite en la interfase plástico-alimento. Sólo las superficies superior e inferior del material alimenticio intercambian humedad con el entorno.

4.3.2 Suposiciones del modelo

Teniendo en cuenta todos los análisis preliminares, se plantearon los siguientes supuestos para el desarrollo del modelo físico del secado RW de una pieza rectangular de material:

1. La muestra es compacta, homogénea y sin vacíos con aire atrapado.
2. La temperatura y la humedad son inicialmente uniformes dentro del material.
3. La difusividad de masa, conductividad térmica, capacidad calorífica y densidad del material son funciones conocidas de su contenido de humedad y/o temperatura.
4. El encogimiento de la rodaja debido al secado es despreciable.
5. El flujo de calor por radiación se absorbe en la superficie de la pieza que está en contacto con la lámina de MylarTM.
6. La transferencia de calor dentro del material es únicamente por conducción y el movimiento de la humedad líquida se produce por difusión.
7. Los gradientes de temperatura y humedad son uni-dimensionales (en dirección perpendicular a la superficie de la membrana de secado (dirección “z”).
8. El trozo de alimento inicialmente está en perfecto contacto con la lámina plástica (MylarTM).
9. Las moléculas de agua están ligadas a las moléculas de sólidos, es decir, no hay agua libre disponible en el trozo de zapallo. Por lo tanto, la presión parcial del vapor del material es más baja que la del agua pura. Se utiliza una correlación apropiada para la presión parcial del vapor como una función de la actividad de agua variable.

4.3.3 Ecuaciones generales y condiciones de frontera

4.3.3.1 Formulación del problema

El material de secado se considera como una lámina de espesor δ_p y longitud L a una temperatura inicial uniforme T_0 y contenido de humedad C_0 . El extremo inferior del material está en contacto con la membrana de secado y el extremo superior está expuesto a corrientes de aire circulando forzosamente. El calor necesario para la evaporación de la humedad líquida, es transferido desde el agua caliente a la muestra a través de la lámina de MylarTM. El agua líquida se evapora desde la superficie exterior del trozo debido a la diferencia de presión de vapor entre el aire convectivo y la superficie de la rodaja. A medida que el contenido de humedad en la superficie de la muestra disminuye, la humedad líquida se difunde desde el material hacia la superficie expuesta. En consecuencia, el proceso de secado se convierte en un problema acoplado de transferencia de calor y masa unidimensional.

4.3.3.2 Ecuación de transferencia de calor

La ecuación de conservación de energía general para el volumen de control, considerando que el calor es transferido únicamente por conducción en la dirección perpendicular al área expuesta de la muestra puede expresarse como:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (4.19)$$

donde, ρ es la densidad (kg/m^3), C_p es el calor específico (J/kg K), T es la temperatura (K), t es el tiempo (s), y k es la conductividad térmica (W/m K). Asumiendo que los extremos laterales del paralelepípedo están aislados, dado que la transferencia de calor es unidimensional (ver Figura 4.1), entonces:

$$\text{En } x = 0 \text{ y } x = L \quad -\mathbf{n} \cdot (-k \nabla T) = 0 \quad (4.20)$$

La condición inicial de la Ec. (4.19) es sencilla ya que se supone que, en $t = 0$, la temperatura del alimento es igual a su valor inicial, es decir T_0 . Las condiciones de frontera se aplican a las superficies externas del alimento donde no se produce acumulación. El calor transportado

por conducción y radiación desde el Mylar™ hacia el alimento se utiliza parcialmente para elevar la temperatura de la muestra por conducción y en parte para permitir la evaporación de agua libre, y está definido por la condición:

$$\text{En} \quad -\mathbf{n} \cdot (-k\nabla T) = q_0 \quad (4.21)$$

donde, q_0 es el flux de calor general hacia el interior del alimento (W/m^2). Inicialmente toma el valor del calor superficial q_s'' calculado con la Ec. (4.15), y luego el valor del calor que transfiere la membrana q_m calculado con la Ec. (4.18), definidos en la sección 4.2.1.2. La inclusión de ambos valores se realizó usando la aproximación de multi-zonas con sección lineal (piecewise linear multizone approximation) (Konovalov et al., 2003).

El calor transportado por convección externa en el lado aire de la superficie de contacto alimento-aire es igual al flux de calor por conducción en el lado alimento menos el calor requerido para evaporar el agua.

$$\text{En } z = \delta_p \quad -\mathbf{n} \cdot (-k\nabla T) = h \cdot (T_a - T_s) + \lambda_w \cdot M_{ws} \quad (4.22)$$

donde, λ_w es el calor latente de vaporización (J/mol), M_{ws} es el flujo difusivo de agua en la superficie del alimento ($\text{mol/m}^2 \text{ s}$), T_a es la temperatura global del aire (K), T_s es la temperatura en la superficie del alimento y h es el coeficiente de transferencia de calor ($\text{W/m}^2 \text{ K}$).

4.3.3.3 Ecuación de transferencia de masa

La ecuación de transferencia de masa en estado no estacionario para la difusión de humedad dentro de un alimento, puede escribirse como:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (D\nabla C) = R_c \quad (4.23)$$

donde, C es la concentración del agua líquida en el alimento (mol/m^3), D es el coeficiente de difusión efectiva del agua en el alimento (m^2/s) y R_e es la tasa molar de evaporación ($\text{mol/m}^3 \text{ s}$) y su magnitud es negativa. La condición inicial de la Ec. (4.23) supone que, en el tiempo $t = 0$, la concentración del alimento es igual a su valor inicial, es decir, C_0 . Asumiendo que los extremos laterales del paralelepípedo no difunden agua, dado que la transferencia de masa es unidimensional (ver Figura 4.1), entonces:

$$\text{En } x = 0 \text{ y } x = L \quad -\mathbf{n} \cdot (-D\nabla C) = 0 \quad (4.24)$$

Las condiciones de frontera relativas a la Ec. (4.23) aplicadas a las superficies externas del alimento expresan el balance entre el flujo difusivo del agua líquida saliendo desde el núcleo del alimento y el flujo de vapor que sale desde la superficie del alimento y se transfiere al aire externo que circula.

$$\text{En } z = \delta_p \quad -\mathbf{n} \cdot (D\nabla C) = k_c(C_s - C_b) \quad (4.25)$$

donde, k_c es el coeficiente de transferencia de masa (m/s), C_b es la concentración del agua en el aire (mol/m^3) y C_s es la concentración del agua evaluada en fase gaseosa en la interface alimento-aire (mol/m^3). Particularmente, en $z = \delta_p$, k_c se evalúa a las condiciones actuales de temperatura y humedad de la superficie exterior, y en $z = 0$ se asume que hay intercambio de masa con el aire en $1/20$ veces k_c (en $z = \delta_p$), causado por espacios con aire presentes bajo las muestras durante el secado, resultando en una resistencia adicional a la transferencia de calor, consideración que ya se discutió en secciones anteriores.

Hasta aquí el modelo incluye los mínimos requisitos para simular el proceso de transferencia simultánea de humedad y calor en el proceso de secado bajo estudio, sin embargo hay otros fenómenos internos del material sucediendo que son de gran importancia los cuales bajo ciertas circunstancias y para hacerlo más preciso se deben adicionar al modelo matemático. Los cambios de fase y/o calor de absorción en algunos materiales porosos y compuestos ocurren frecuentemente en varias aplicaciones de ingeniería (Datta, 2007). Si el alimento es

tratado como un medio poroso, se debe describir un transporte multifásico del agua líquida, y el gas comprendido por vapor de agua y aire. La tasa de evaporación R_c de la Ec. (4.23), depende entonces del equilibrio líquido-vapor cuando el cambio de fase se da al interior del alimento específicamente dentro del poro. Su determinación se discutirá más adelante.

El modelo matemático anterior se resuelve para la fase líquida. Para la fase gaseosa, se expresan las variaciones de la concentración en cada componente (vapor de agua y aire) durante el proceso, obtenidas mediante solución de las respectivas ecuaciones de conservación en términos de sus fracciones másicas w_v y w_a .

$$\rho \frac{\partial w_i}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{N}_i = R_{wi} \quad (4.26)$$

donde, \mathbf{N} es el flujo total de la fase líquida ($\text{kg/m}^2 \text{ s}$) y R_{wi} es la tasa de evaporación para la especie i y su magnitud es positiva. Considerando difusión binaria, entonces:

$$w_v + w_a = 1 \quad (4.27)$$

Tomando el vapor de agua como la especie de referencia para solución, la condición inicial de la Ec. (4.26) ($t = 0$) es la concentración del vapor de agua igual a su valor inicial, w_{v0} . Suponiendo que en ambos lados, izquierdo y derecho del paralelepípedo no se difunde vapor, entonces:

$$\text{En } x = 0 \text{ y } x = L \quad -\mathbf{n} \cdot \mathbf{N}_i = 0 \quad (4.28)$$

Las condiciones de frontera para la Ec. (4.26) en las superficies inferior y exterior de la muestra están dadas respectivamente por:

$$\text{En } z = 0 \quad -\mathbf{n} \cdot \mathbf{N}_i = 0 \quad (4.29)$$

$$\text{En } z = \delta_p \quad -\mathbf{n} \cdot \mathbf{N}_i = k_c(C_v - C_s) \quad (4.30)$$

donde, C_v es la concentración del vapor en el gas (mol/m^3). Su determinación se describe al final de la sección a continuación.

4.3.4 Parámetros y Ecuaciones auxiliares

4.3.4.1 Propiedades físicas

Las propiedades físicas de los alimentos, en la mayoría de los casos, dependen de la concentración local y de la temperatura del alimento. Para el actual estudio, se consideró una pieza rectangular (paralelepípedo) de longitud de 6 cm ($L = 0.06$ m) y espesor de 1.25 cm ($\delta_p = 0.0125$ m). Se escogió el zapallo como alimento modelo. Las siguientes relaciones se usaron en el modelo matemático ya descrito.

En la modelación de procesos de secado de frutas y vegetales se usa comúnmente la siguiente relación de densidad ρ (kg/m³) en función del contenido de humedad en base seca (X) (Ruiz-López et al., 2004):

$$\rho = 440,000 + 90,000 \cdot X \quad (4.31)$$

La relación para la conductividad térmica k (W/m K) en función del contenido de humedad (bs) fue publicada por Mujumdar (1995) para vegetales:

$$k = 0.49 - 0.443 \cdot \exp(-0.206X) \quad (4.32)$$

La correlación para el calor específico C_p (J/kg K) dada a continuación fue utilizada por Ruiz-López et al. (2004) y Aversa et al. (2007) en la modelación del secado de zanahoria:

$$C_p = 1750 + 2345 \cdot \left(\frac{X}{1+X} \right) \quad (4.33)$$

La siguiente dependencia del coeficiente de difusión efectiva D (m²/s) con la temperatura como una función de Arrhenius fue publicada recientemente para el secado convectivo de zapallo (*Cucurbita moschata*) (Guiné et al., 2012):

$$D = D_e^0 \exp\left(-\frac{E_d}{R(T+273)}\right) \quad (4.34)$$

donde, D_e^0 es la difusividad para una temperatura infinita (m^2/s), E_d es la energía de activación para la difusión de humedad (kJ/mol) y R es la constante de los gases (8.31451 J/mol K). Mediante ajuste de parámetros según el modelo de difusión de capa delgada Guiné et al. (2012) encontraron que los valores de D_e^0 y E_d durante el secado convectivo de zapallo fueron $3.884 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ y 32.262 kJ/mol , respectivamente.

4.3.4.2 Coeficientes de transferencia

Los coeficientes de transferencia de masa (k_c) y de calor (h) se calcularon basados en correlaciones semi-empíricas conocidas como analogías de Chilton-Colburn (Perry & Green, 1984; Bird et al., 1960). Usando estas analogías, el coeficiente de transferencia de calor (h) se expresa mediante la dependencia del número de Nusselt (N_u) de los números de Reynolds (R_e) y Prandtl (P_r) para el flujo turbulento de un fluido afuera de un cuerpo sólido (Welti-Chanes et al., 2003):

$$N_u = \frac{hL_c}{k_w} = (0.35 + 0.47R_e^{0.52})P_r^{0.3} \quad (4.35)$$

donde, L_c es la longitud característica y k_w es la conductividad térmica del fluido. Después de determinar h , el coeficiente de transferencia de masa k_c , se calculó con (Vafai, 2000):

$$k_c = h \left(\frac{DL_e^n}{k_w} \right) \quad (4.36)$$

donde, L_e es el número de Lewis que representa una medida de los espesores relativos de las capas límite de temperatura y concentración, D es la difusividad másica (m^2/s) y k_w es la conductividad térmica del agua líquida (W/m K). Para muchas aplicaciones, es razonable asumir un valor de $n=1/3$ (Incropera and De Witt, 2001). Sin embargo, se puede asumir una correlación tipo Arrhenius para k_c en función de la temperatura (Guiné et al., 2012):

$$k_c = k_c^0 \exp\left(-\frac{E_k}{R(T+273)}\right) \quad (4.37)$$

donde, k_c^0 es la constante de Arrhenius (m/s) y E_k es la energía de activación para la transferencia de masa convectiva (kJ/mol). Mediante ajuste de parámetros según el modelo de difusión de capa delgada Guiné et al. (2012) encontraron que los valores de k_c^0 y E_k durante el secado convectivo de zapallo fueron 3.798×10^8 m/s y 86.254 kJ/mol, respectivamente.

4.3.4.3 Relaciones auxiliares

La primera de las relaciones de vital importancia para el modelo es la concentración en la interfase aire-alimento, C_s . Para calcular los valores de C_s en la Ec. (4.25), se usó la siguiente relación de equilibrio termodinámico entre la concentración del agua en la superficie externa del alimento y la concentración del agua en la fase gaseosa:

$$p_w^{sat} \cdot a_{ws} = P \cdot y_s \quad (4.38)$$

donde, p_w^{sat} es la presión de vapor del agua a la temperatura de interfase (Pa) y a_{ws} es la actividad de agua en la superficie externa del alimento. El término de la derecha de la Ec. (4.38) es la presión del vapor en la superficie p_v , siendo P la presión del aire (Pa) y y_s la fracción molar del agua (Wang y Brennan, 1995; Aversa et al., 2007; Curcio et al., 2008).

La presión p_w^{sat} es la presión de vapor de agua pura a la temperatura de interfase T_s y está dada por la ecuación de Clausius-Clapeyron (Halder et al., 2011):

$$p_w^{sat}(T) = p_0 \exp\left(\frac{\lambda_w}{R} \frac{(T-T_0)}{TT_0}\right) \quad (4.39)$$

donde, p_0 es la presión parcial del agua en el alimento en $t = 0$ (Pa) y λ_w es el calor latente de vaporización del agua (kJ/kg).

La actividad de agua es un parámetro distintivo de cada producto que, caracterizado por su propia estructura, determina la fuerza de los enlaces entre la estructura del alimento y el agua.

Siendo la mayoría de los alimentos, materiales higroscópicos, es usual expresar la actividad de agua como una función del contenido de humedad en equilibrio y su temperatura (Datta, 2007; Ruiz-Lopez et al., 2004). Tomando el ajuste de las isotermas de sorción al modelo de GAB realizado por Molina Filho et al. (2011) para el zapallo fresco (*Cucurbita moschata*), se obtuvo la siguiente correlación para la actividad de agua:

$$a_w = 0.395426 - \frac{0.018052}{X_s} + 0.018052 \left[\left(21.9051 - \frac{1}{X_s} \right)^2 + 547.392 \right]^{0.5} \quad (4.40)$$

La Ec. (4.40) es esencial para describir apropiadamente las complejas etapas que se involucran en un proceso de secado. La actividad de agua de un alimento decrece en cuanto su contenido de humedad decrece, entonces un valor de 1 en la actividad de agua denota que hay evaporación únicamente de agua libre. Pero si el valor es menor que la unidad, el agua ligada también es removida (Barati y Esfahani, 2010).

Finalmente, con los valores actuales de X_s y T_s , a través de la Ec. (4.38), se determina el valor de la concentración de agua en la interfase alimento-aire C_s , mediante la relación (Aversa et al., 2007):

$$y_s = \frac{C_s}{\rho_g} \quad (4.41)$$

donde, ρ_g es la densidad molar de la fase gaseosa. El proceso de evaluación de C_s es cíclico durante la simulación numérica. También se puede usar la relación:

$$C_s = \frac{a_{ws} P_w^{sat}}{RT} \quad (4.42)$$

Como se dijo, a_{ws} es la actividad de agua de la Ec. (4.40) evaluada en la superficie exterior expuesta a intercambio con el aire.

Las distribuciones de temperatura y contenido de humedad expresados en las Ecs. (4.19) y (4.23) acopladas a las condiciones de frontera, forman un sistema de EDP no lineales que

junto con las relaciones y parámetros arriba expresados constituyen el modelo matemático del sistema bajo análisis que puede resolverse solo por métodos numéricos.

La otra relación necesaria para el modelo es la tasa de evaporación volumétrica R_{wv} , y su determinación está basada en el intenso análisis que hicieron Ni et al. (1999) para el transporte de humedad para un modelo multi-fásico de medio poroso. Ellos consideran que las fronteras del sistema son abiertas y hay ausencia de “bombeo” de líquido por lo tanto, el flujo de agua (líquido y vapor) que alcanza la frontera desde el interior es completamente evaporado y eliminado por convección como vapor al ambiente.

En ese sentido, el término R_C de la Ec. (4.23) se considera igual a R_{wv} de la Ec. (4.26) en magnitud pero con signo contrario y su cálculo está determinado por el tiempo en que el sistema llega al equilibrio, Δt (Halder et al., 2011). Esta diferencia de tiempo Δt depende de la distancia que tiene el vapor para difundirse y de la tasa de difusión. Para el sistema actual, durante el tiempo Δt , la tasa de evaporación promedio sobre el tiempo y espacio está dada por:

$$R_{wv} = \frac{(\rho_{v,f} - \rho_{v,i})}{\Delta t} = \frac{M_v}{RT} \frac{(p_{v,f} - p_{v,i})}{\Delta t} \quad (4.43)$$

donde, $\rho_{v,f}$ es la densidad final del vapor después del tiempo de equilibrio y es igual a la densidad del vapor en equilibrio y $\rho_{v,i}$ es la densidad inicial del vapor. Así mismo, $p_{v,f}$ y $p_{v,i}$ son las presiones del vapor al final del equilibrio o en el equilibrio ($p_{v,eq}$) y al inicio, respectivamente. La presión del vapor en equilibrio, $p_{v,eq}$ está determinada por datos experimentales (Halder et al., 2011):

$$\ln \frac{p_{v,eq}}{p_w^{sat}(T)} = f(C, T) \quad (4.44)$$

Donde, $p_w^{sat}(T)$ es la presión de vapor del agua pura a la temperatura T y es la misma ecuación de Clausius-Clapeyron dada por la Ec. (4.39).

Volviendo a la Ec. (4.30), el término C_v se calcula como:

$$C_v = w_v \cdot \rho_g \quad (4.45)$$

donde, ρ_g es la densidad del gas (mezcla aire y vapor) (kg/m^3). Esta última se obtiene mediante:

$$\rho_g = \frac{M_g P}{RT} \quad (4.46)$$

donde, M_g es el peso molecular de la mezcla gaseosa, P es la presión local y T es la temperatura actual en el alimento. P se considera constante dado que no se incluye la Ley de Darcy en el problema conjugado para medio poroso.

4.4 RESUMEN DE CAPITULO

El modelado del secado de alimentos puede resultar en un proceso tan complejo como se desee. El sistema RW se puede modelar de una forma simple si se asemeja a un secador de contacto directo y se consideran condiciones de frontera agrupadas. Pero también se puede modelar considerando el producto a secar como un medio poroso, lo cual complica la solución. La clave está en escoger correctamente el sistema, hacer suposiciones adecuadas y considerar las condiciones de frontera más apropiadas. Se desarrolló un modelo teórico-físico unidimensional para estudiar la transferencia de masa y calor dentro de un trozo grueso y rectangular de zapallo durante el secado RW basado en las ecuaciones gobernantes de la ley de Fourier y la segunda Ley de Fick. En la siguiente tabla se resumen las ecuaciones del modelo.

Tabla 4.2. Resumen del Modelo Matemático

Ecuaciones Gobernantes	Transferencia de calor (Ec. 4.19):	Transferencia de masa de agua líquida (Ec. 4.23):	Transferencia de masa en el poro (Ec. 4.26): $\rho \frac{\partial w_i}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{N}_i = R_{wi}$
------------------------	------------------------------------	---	---

	$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}$ $= \nabla \cdot (k \nabla T)$	$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (D \nabla C) = R_c$	Con: $w_v + w_a = 1$
Condiciones de Frontera En $x = 0$ y $x = L$ $z = 0$ $z = \delta_p$	$-\mathbf{n} \cdot (-k \nabla T) = 0$ $-\mathbf{n} \cdot (-k \nabla T) = q_0$ $-\mathbf{n} \cdot (-k \nabla T) = h \cdot (T_a - T_s) + \lambda_w \cdot M_{ws}$	$-\mathbf{n} \cdot (-D \nabla C) = 0$ $-\mathbf{n} \cdot (D \nabla C) = k_c (C_s - C_b)$	$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{N}_i = 0$ $-\mathbf{n} \cdot \mathbf{N}_i = 0$ $-\mathbf{n} \cdot \mathbf{N}_i = k_c (C_v - C_s)$
Parámetros y Ecuaciones auxiliares			
Propiedades físicas	Densidad (Ec. 4.31): $\rho = 440,000 + 90,000 \cdot X$	Conductividad térmica (Ec. 4.32): $k = 0.49 - 0.443 \cdot \exp(-0.206X)$	
	Calor específico (Ec. 4.33): $C_p = 1750 + 2345 \cdot \left(\frac{X}{1+X}\right)$	Difusividad efectiva (Ec. 4.34): $D = D_e^0 \exp\left(-\frac{E_d}{R(T + 273)}\right)$	
Coeficientes de transferencia	Calor (Ec. 4.35): $N_u = \frac{h L_c}{k_w} = (0.35 + 0.47 R_e^{0.52}) P_r^{0.3}$	Masa (Ec. 4.36): $k_c = h \left(\frac{D L_e^n}{k_w}\right)$	
Relaciones auxiliares	Relación de equilibrio (Ec. 4.38): $p_w^{sat} \cdot a_{ws} = P \cdot y_s$	Presión de vapor de agua (Ec. 4.39): $p_w^{sat}(T) = p_0 \exp\left(\frac{\lambda_w}{R} \frac{(T - T_0)}{T T_0}\right)$	
	Actividad de agua (Ec. 4.40):	Concentración en la interfase aire-alimento (Ec. 4.42): $C_s = \frac{a_{ws} p_w^{sat}}{RT}$	

	a_w $= 0.395426 - \frac{0.018052}{X_s}$ $+ 0.018052 \left[\left(21.9051 - \frac{1}{X_s} \right)^2 + 547.392 \right]^{0.5}$	
	<p>Tasa de evaporación (Ec. 4.43):</p> $R_{wv} = \frac{(\rho_{v,f} - \rho_{v,i})}{\Delta t} =$ $\frac{M_v}{RT} \frac{(p_{v,f} - p_{v,i})}{\Delta t}$	<p>Presión del vapor en equilibrio (Ec. 4.44):</p> $\ln \frac{p_{v,eq}}{p_w^{sat}(T)} = f(C, T)$

5. SIMULACIÓN COMPUTACIONAL Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS

El uso de métodos de discretización como Runge-Kutta y Crank-Nicholson es común en la solución de problemas de transferencia de masa y calor de procesos que involucran los alimentos. A causa de que cada problema es individual existen códigos desarrollados por investigadores para aplicaciones específicas escritos en lenguajes de programación como FORTRAN (Villa-Corrales et al., 2010) y MATLAB (Sun et al., 2005).

No obstante, existen códigos de dominio público o software comercial que permiten resolver el problema individual con un sistema multi-físico personalizable. El uso de paquetes tipo CFD (Computational Fluids Dynamics) para simular la transferencia simultánea de masa y calor en procesos de secado tales como FEMLAB (Aversa et al., 2007), FLUENT (Kaya et al., 2006 y 2008) y COMSOL (Curcio et al., 2008; Datta, 2007) se ha publicado recientemente. COMSOL parece ser bastante prometedor; aunque se ha usado en múltiples aplicaciones de la ingeniería de procesos y aeroespacial, hasta el momento ha sido muy poco usada en el procesamiento de alimentos u otros sistemas similares. Sin embargo, ya se encuentran aplicaciones a sistemas biomédicos (Datta y Rakesh, 2010).

5.1 MÉTODO NUMÉRICO Y PAQUETE COMPUTACIONAL

El sistema acoplado para la temperatura y el contenido de humedad puede manejarse a través de los enfoques analítico y numérico, dependiendo de la complejidad del problema específico considerado. Los métodos numéricos son útiles para estimar el comportamiento térmico de los alimentos en condiciones complejas, pero realistas, como la variación de la temperatura inicial, propiedades térmicas no lineales y no isotrópicas, los cuerpos de forma irregular y las condiciones de frontera tiempo dependientes (Wang y Sun, 2003).

Tanto el método de diferencias finitas (FD) como el método de elementos finitos (FEM) se han usado ampliamente para este propósito. FEM es particularmente adecuado para la investigación de dominios caracterizados por geometrías irregulares en presencia de

condiciones de frontera complejas y para materiales heterogéneos. Sin embargo, es más complejo y costoso computacionalmente que FD (Wang y Sun, 2003). FEM implica la discretización de un dominio grande en un gran número de elementos pequeños, el desarrollo de las ecuaciones de cada elemento, el conjunto de sus contribuciones a todo el dominio, y la resolución de las ecuaciones del conjunto.

La discretización FEM de las ecuaciones diferenciales gobernantes se basa en el uso de interpolación polinomial para describir la variación de una variable de salida dentro de un elemento (Aversa et al., 2007). Debe recordarse que la discretización espacial para FEM es diferente en comparación con el método de FD, el cual se emplea generalmente para la progresión de una variable en un problema transitorio. Sin embargo, el método de FEM ha sido utilizado con éxito para resolver modelos de transferencia de calor y masa para procesos de calentamiento y secado (Wang y Sun, 2003).

Un software comercial y de dominio público puede reducir potencialmente o eliminar el tiempo de desarrollo del código para un sistema de ecuaciones discretizadas mediante FEM. El uso de un software comercial basado en FEM del tipo fluido dinámico computacional (CFD) puede parecer una buena opción para resolver un modelo basado en la física ya que las ecuaciones gobernantes de conservación se pueden implementar en la mayoría de estos programas (Sablani et al., 2007). COMSOL Multiphysics es un paquete tipo CFD con características únicas en la representación de dominios multi-enlazados con geometría compleja, sistemas de ecuaciones no lineales y altamente acopladas, y límites arbitrariamente complicados, relaciones auxiliares, y condiciones iniciales.

5.2 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

El sistema de EDP no lineales resultantes en la presente modelación (descrita en la sección 4.2.3) se resolvió numéricamente por el método de elementos finitos utilizando COMSOL Multiphysics 4.3a. (Comsol Inc., Burlington, MA.). El módulo de "transferencia de calor" se

implementó para la temperatura en el interior del material alimenticio y de la lámina de Mylar™ en la superficie; el módulo de “Transporte en Especies Diluídas” se usó para resolver la conservación del agua líquida en el zapallo. Para resolver la fracción de masa de vapor se utilizó el módulo “Transporte de Especies Concentradas”.

El dominio computacional consiste en un sistema 2D (trozo rectangular de zapallo) creado de acuerdo con las dimensiones mencionadas en la Tabla 5.1. Para todas las variables se utilizaron funciones de tipo lineal. La muestra de alimento se discretizó en 1336 elementos finitos triangulares organizados linealmente que conduce a unos 2190 grados de libertad. La Figura 5.1 muestra los detalles de la malla considerada, la cual proporciona una resolución espacial satisfactoria para el sistema en estudio (se encontró que la solución era independiente del tamaño de la cuadrícula incluso con mayor refinamiento).

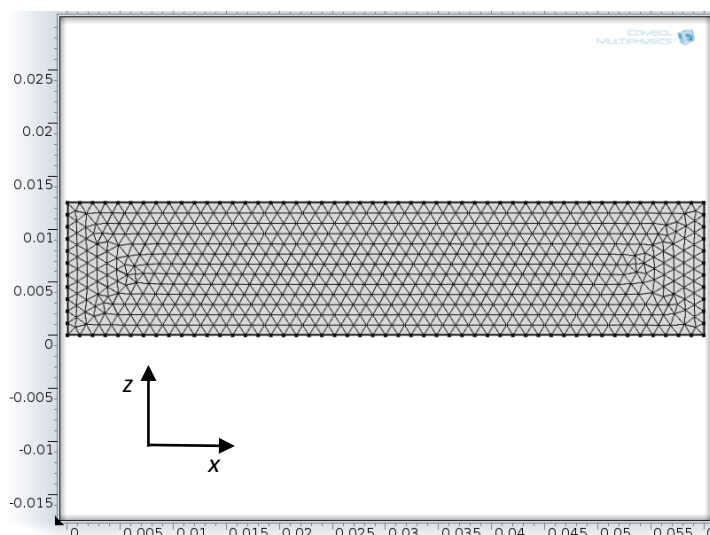


Figura 5.1. Malla construida en COMSOL usada para el modelo del secado RW de una pieza rectangular de zapallo

El problema tiempo dependiente se resolvió por un esquema implícito de paso-tiempo, conduciendo a un sistema no lineal de ecuaciones para cada paso de tiempo. La tolerancia relativa se estableció en 0.0005. En un computador portátil con procesador Intel®Core™i3 bajo Windows 8 de 4 GB de memoria RAM, se simuló un tiempo de secado de 5 h con paso

de tiempo de 2 segundos. Los trozos gruesos de zapallo requirieron alrededor de 3.5 minutos de tiempo de CPU, utilizando el solucionador iterativo no lineal dependiente del tiempo ya implementado en COMSOL.

5.3 PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN DEL MODELO

Los parámetros de entrada y otras condiciones de configuración inicial del modelo matemático de este estudio se presentan en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Parámetros y condiciones necesarias para el modelo

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades	Fuente
Alimento				
<i>Dimensiones</i>				
Espesor	δ_p	0.01	m	Este trabajo
Longitud	L	0.06	m	Este trabajo
<i>Propiedades físicas</i>				
Densidad	ρ	Ec. (4.31)	kg/m ³	Ruiz-López et al., 2004
Conductividad térmica	k	Ec. (4.32)	W/m K	Aversa et al., 2007
Capacidad calorífica	C_p	Ec. (4.33)	J/kg K	Ruiz-López et al., 2004
Difusividad efectiva	D	Ec. (4.34)	m ² /s	Guiné et al., 2012
<i>Propiedades de transporte</i>				
Coeficiente de transferencia de calor	h	Ec. (4.35)	W/m ² s	Wolti-Chanes et al., 2003
Coeficiente de transferencia de masa	k_c	Ec. (4.37)	m/s	Guiné et al., 2012
<i>Otras propiedades</i>				
Actividad de agua	a_w	Ec. (4.40)		Molina Filho et al., 2011
Porosidad	ϕ	0.93	---	
Mylar™				
<i>Dimensiones</i>				
Espesor	δ_m	2.5x10 ⁻⁴	m	

<i>Propiedades ópticas</i>				
Reflectividad espectral				
Aire-Mylar TM	$\rho_{\lambda,1}$	0.0598		Este trabajo
Agua-Mylar TM	$\rho_{\lambda,2}$	0.0132		Este trabajo
Absorptividad espectral	α_{λ}	Ec. (4.13)		Almeida et al., 2006
Transmisividad espectral	τ_{λ}	Ec. (4.11)		Siegel y Howell, 2002
<i>Propiedades físicas</i>				
Conductividad térmica	k_m	0.15-0.24	W/m K	Dupont Teijin Film
Modelo matemático				
<i>Condiciones iniciales (alim)</i>				
Contenido de humedad	X_0	13.4 (bs)	kg _w /kg _{ss}	Este trabajo
	C_0	1023	mol/m ³	Este trabajo
Temperatura	T_0	293.15	K	
Fracción molar del vapor	w_{v0}	0.0192	---	Este trabajo
<i>Condiciones de frontera</i>				
Calor de superficie	q_s''	1426	W/m ²	Este trabajo
Calor a través del Mylar TM	q_m	566	W/m ²	Este trabajo
Concentración interfase aire- alimento	C_s	Ec. (4.42)		Este trabajo
Concentración del vapor	C_v	Ec. (4.45)	mol/m ³	Este trabajo
Otros				
Conductividad térmica agua	k_w	0.68	W/m K	
Emisividad del agua	ε_w	0.95	---	
Calor latente de vaporización	λ_w	2260	kJ/kg	
Presión de vapor del agua	p_w^{sat}	Ec. (4.39)	Pa	Halder et al., 2011
Temperatura del aire	T_a	298.15	K	
Presion ambiente (abs)	P	101,325	Pa	

5.4 RESULTADOS DE SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

La mayoría de los experimentos reportados para el secado RW utilizaron muestras delgadas con un espesor del orden de milímetros. Como tal, los productos con calidad superior se han obtenido a partir de muestras delgadas como se ha señalado. Sin embargo, no existen datos experimentales sobre la temperatura o la humedad para muestras gruesas ni comentarios sobre la retención de su calidad. Por lo tanto, se llevaron a cabo experimentos de secado para trozos de zapallo con un espesor promedio de alrededor de 1 cm. Este valor es relativamente grande en comparación con el espesor de la muestra considerada por otros investigadores (Nindo et al., 2003; Abonyi et al., 2002). El modelo desarrollado se ejecutó de acuerdo a las dimensiones del trozo de zapallo para un tiempo total de secado de 5 horas.

En esta sección se presentan los resultados de la simulación, la pérdida de humedad y las temperaturas en la superficie inferior y superior del alimento se compararon con los resultados experimentales disponibles para el secado de muestras gruesas de zapallo. Ambos perfiles de temperatura y de humedad se muestran como funciones del tiempo de secado.

5.4.1 Medición de la pérdida de humedad

El contenido de humedad inicial de las muestras se determinó por el método de estufa a 60°C y humedad constante durante 24 h (n.20.013 AOAC, 1980). La pérdida de humedad de las muestras durante el secado se llevó a cabo mediante el pesaje de las muestras a intervalos de 10 min hasta 5 horas de secado utilizando una balanza digital (marca Ohaus® Adventurer™) que tiene una precisión de 0.01 g.

5.4.2 Perfiles experimentales y simulados de humedad

Cinéticas de humedad en base seca similares a la observada en la Figura 5.2 se han reportado ampliamente para diversos materiales alimenticios (Abonyi et al., 1999; Ghanem 2010; Abul-Fadl y Ghanem, 2011; Ochoa et al., 2012; Ocoró y Ayala, 2013). Estos son consistentes en presentar un decrecimiento rápido del contenido de humedad hasta valores por debajo de 0.05 (bs) para muestras de muy bajo espesor. Puesto que se llevaron a cabo en un sistema de

secado RW continuo y el alimento como puré, el tiempo de secado fue mucho más corto que los encontrados en el presente trabajo. Sin embargo, los resultados de la Figura 5.2 demuestran la capacidad de la técnica RW para secar trozos gruesos de zapallo.

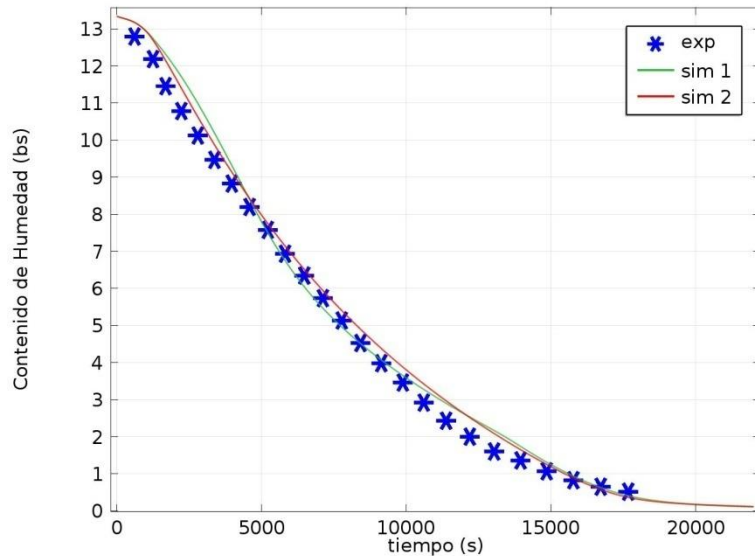


Figura 5.2. Contenido de humedad (bs) experimental y predicho en función del tiempo durante el secado RW de rodajas gruesas de zapallo.

La Figura 5.2 también muestra la comparación entre los cambios predichos y observados experimentalmente en el contenido de humedad en base seca para una muestra gruesa de material después de 5 h de secado RW. El contenido de humedad experimental sigue un perfil descendente suave desde el valor inicial del contenido de humedad secando desde 13.4 a 0.5. El hecho de que la superficie inferior de los trozos de zapallo no estuvo siempre en contacto con la lámina de plástico dificulta la reproducción de los datos experimentales. Sin embargo, el modelo predice la pérdida de humedad en todos los instantes de tiempo de una forma adecuada. Las dos curvas simuladas de la Figura 5.2 indican la sensibilidad del modelo a diferentes condiciones de transferencia de masa que se discutirán más adelante.

La Figura 5.3 muestra algunas instantáneas del zapallo en diferentes etapas del secado. A partir de estas figuras, se puede ver claramente el desarrollo de espacios de aire entre la

superficie inferior del alimento y de la lámina de plástico. El material se somete a grandes deformaciones, encogimiento y flexión durante el proceso. Esto se traduce en el desarrollo de espacios de aire entre la superficie inferior y la lámina de plástico creando una resistencia adicional (o de contacto) para la transferencia de calor desde el Mylar™ que impide la rápida remoción de humedad. A partir de observaciones visuales, los extremos del material se doblan hacia arriba hasta 0.5 cm desde la base durante el proceso de secado. Como consecuencia del desarrollo de este espacio de aire, el flujo neto de calor desde la membrana disminuye y por lo tanto la tasa de pérdida de humedad del material se reduce.



Figura 5.3. Fotografías de zapallo en diferentes instantes del tiempo durante el secado RW

5.4.3 Medición de la distribución de temperatura

Sobre la lámina de Mylar™ se distribuyeron ordenadamente 40 trozos de zapallo, se seleccionaron al azar tres muestras y se insertaron dos termopares en cada muestra. Las temperaturas se registraron usando un sistema de monitoreo electrónico con termopares tipo J con precisión de $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ y un tiempo de respuesta de 30 segundos. Los termopares se insertaron en el producto para registrar las temperaturas en la parte inferior y superior de la muestra durante el secado. Las muestras se colocaron en la membrana de Mylar™ con una

temperatura del baño de agua controlada de $90 \pm 2^\circ\text{C}$. Esta se registró cada 5 min con un termómetro de bulbo de mercurio ($0\text{-}100^\circ\text{C}$). Un ventilador se ubicó a 1.5 m por delante del sistema para soplar aire a una velocidad de 0.5 m/s en sentido paralelo a las muestras, que se encendió justo unos segundos antes de que comenzaran los registros térmicos. Las mediciones de velocidad de aire fueron tomadas cada 30 minutos. Durante los experimentos, se aseguró de que los termopares no salieran de las muestras para evitar registros de temperatura erróneos. El tiempo de secado de las muestras fue de aproximadamente 5 horas.

5.4.4 Perfiles experimentales y simulados de temperatura

Similares comportamientos a los mostrados en la Figura 5.4 se pueden observar en trabajos publicados previamente para secado RW (Nindo et al., 2003a; Dongfeng et al., 2009; Ochoa et al., 2012). Incluso, en otras técnicas de secado por contacto directo (Konovalov et al., 2003 y 2004) y también en procesos de secado con alguna contribución de tipo radiante (Salagnac et al., 2004; Nowak y Lewicki, 2004; Sun et al., 2005; Swasdisevi et al., 2009). Se destaca la presencia de mesetas de temperatura después de un intenso calentamiento. También se destaca la diferencia de temperatura de las superficies de la muestra respecto a la temperatura del baño. Se pueden observar diferencias de más de 20°C entre ellas.

Se realizaron mediciones puntuales de temperatura de las muestras de zapallo en dos puntos diferentes en la superficie de la muestra. Las distribuciones de temperatura observadas en puntos específicos de las superficies superior e inferior se muestran en la Figura 5.4. Para la superficie inferior de la muestra, la temperatura en el momento inicial es igual a la de la atmósfera, luego experimenta un rápido aumento durante los primeros 15 minutos de secado; seguido por una pequeña depresión y después la temperatura se mantiene constante en torno a 62°C (335 K) durante el resto del proceso. Una vez que gran parte de la humedad se pierde, hacia el final del proceso, la temperatura comienza a aumentar. Para la superficie superior, sin embargo, la temperatura muestra un rápido aumento inicial hasta 15 minutos aproximadamente, luego hay un establecimiento corto de temperatura alrededor de 42°C (315 K) y finalmente un aumento gradual hasta el final. Este último se atribuye a la continua disminución del contenido de humedad hacia las capas superiores formando una costra que

es de baja conductividad térmica la cual actúa como una resistencia a la transferencia de calor hacia la parte superior del material. La diferencia de temperaturas entre los dos extremos de las muestras se atribuye al enfriamiento evaporativo que afecta principalmente la parte superior de la muestra.

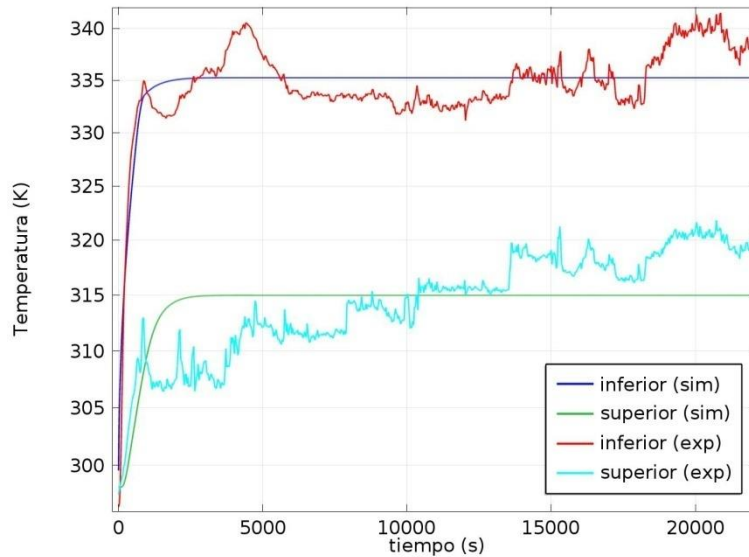


Figura 5.4. Perfiles de temperatura experimentales y simulados de muestras de zapallo en las superficies superior e inferior

La Figura 5.4 también muestra los resultados de las predicciones del modelo. Allí se pueden observar dos regiones definidas tanto para la superficie inferior como la superior: hay un aumento inicial de la temperatura similar a los experimentos, seguido por una región de meseta debido a la intensa evaporación de agua líquida que causa el enfriamiento local. El aumento inicial es el resultado de dos contribuciones diferentes: (1) el calor transferido desde el agua a través del MylarTM proporciona el calor sensible necesario para aumentar la temperatura de la materia seca por conducción y (2) el calor latente de vaporización necesario para la evaporación del agua. La región de cuasi equilibrio depende de la convección por la diferencia de temperatura entre el sólido y el aire; tan pronto la temperatura en la superficie alcanza la temperatura de bulbo húmedo, la velocidad de secado aumenta porque el calor latente da lugar a la evaporación de agua libre además de causar enfriamiento.

En el caso de la superficie inferior, los datos experimentales se ajustan a los simulados teniendo en cuenta que las fluctuaciones de los primeros corresponden a ruidos propios de la experimentación. Sin embargo, el aumento previsto de la temperatura durante las porciones posteriores del proceso no se observa durante las simulaciones. Como se mencionó anteriormente, esto es debido a un contacto imperfecto entre la superficie de los alimentos y la lámina de plástico debido a que el flujo de calor cambia continuamente con el tiempo de secado, lo cual no se tuvo en cuenta para esta simulación. En consecuencia, un perfil de temperatura bastante constante hacia el final del secado, se obtuvo con el modelo. Para la superficie superior, también se observa una región de meseta para la temperatura predicha durante todo el proceso después de un rápido aumento inicial. Un promedio de los datos experimentales produce una desviación estándar de 10% respecto a los simulados en la zona de meseta.

En aproximaciones al estudio de medio poroso en el procesamiento de alimentos, Datta (2007) explicó que “en un material de elevada humedad, la temperatura interior tiende a ser constante a su temperatura de bulbo húmedo, independientemente de la temperatura límite. Esto es debido al equilibrio dinámico entre la evaporación en la superficie y la difusión capilar de agua líquida a una muy alta difusividad capilar debida al gran contenido de humedad. A medida que el nivel de humedad cae, la difusividad capilar se reduce y los perfiles empiezan a ser como de difusión únicamente... tales perfiles son característicos de procesos de secado conducidos por capilaridad. La baja conductividad térmica de la región seca de la superficie, junto con la evaporación, conduce a una caída significativa en la temperatura de la superficie hacia el interior. Los perfiles de temperatura casi lineales son indicativos de un proceso de conducción de calor en estado pseudo-estacionario. La temperatura es algo uniforme en la región del núcleo (interior), principalmente debido a la presencia de la zona de evaporación que actúa como un sumidero para la energía entrante desde la superficie”. Este comportamiento se registró durante la deshidratación de alimentos mediante horneado, fritura y calentamiento por microondas. Por lo anterior, el estudio de la transferencia de masa y calor en el secado RW desde la aproximación de medio poroso necesita investigarse más. No obstante, es evidente que las suposiciones consideradas en el

planteamiento del modelo fueron válidas para ajustar los resultados.

Hasta ahora, los resultados de simulación para los datos de temperatura mostraron buen ajuste asumiendo que el flujo de calor en el extremo inferior de la muestra es el resultado de dos contribuciones acopladas en una función lineal por partes (piecewise linear multizone) dependiente de la temperatura $q_0(T)$ obteniéndose una región de meseta (ver Figura 5.4). Adicionalmente, para mejorar los ajustes se realizaron simulaciones usando una función lineal por partes (linear piecewise) dependiente del tiempo $q_0(t)$. Esta se obtuvo mediante cálculos manuales teniendo en cuenta el aporte de radiación IR en los diferentes picos de absorción del agua.

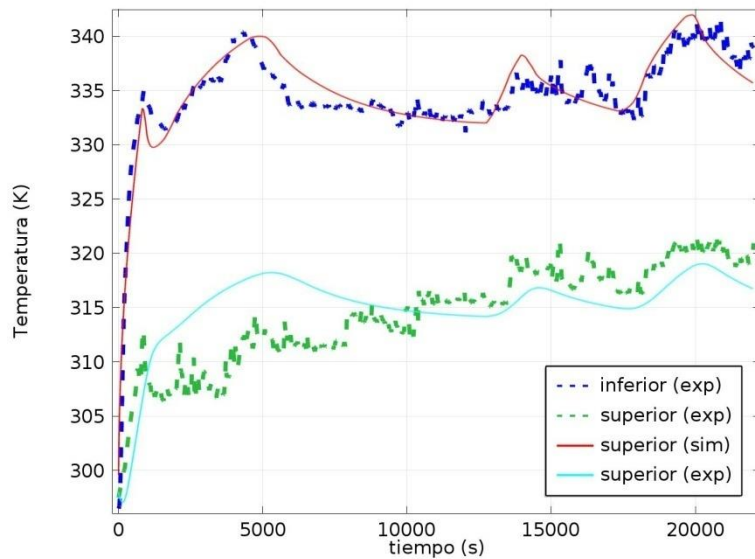


Figura 5.5. Resultados de temperatura experimentales y de simulación ajustados del secado RW de rodajas de zapallo en las superficies superior e inferior

La Figura 5.5 muestra los resultados del ajuste anterior. Se puede observar mayor precisión en los resultados de las temperaturas de la región inferior, sin embargo expresar una función continua teniendo en cuenta las contribuciones de calor por radiación IR en el secado RW según los picos de absorción es un aspecto que se recomienda continuar estudiando. Los resultados de arriba hacen parte de las pruebas de sensibilidad del modelo aquí presentado.

5.4.5 Otros resultados de simulación

La Figura 5.6 muestra los perfiles de temperatura a diferentes tiempos durante el secado RW de trozos rectangulares de zapallo. La gama de colores escogida indica la variación desde el nivel más caliente (rojo) al más frío (azul). La temperatura en la superficie del alimento alcanza rápidamente 315 K (42°C) en la superficie inferior y 335 K (62°C) en la superior durante los primeros 30 min (1800 s) de secado, y luego permanece constante a 42°C y 62°C, respectivamente durante el resto del proceso, comenzando desde un valor inicial de 298 K (25°C). La regulación de los niveles de temperatura por debajo de la temperatura del agua caliente en muestras tipo puré es una característica del secado RW ampliamente reportada.

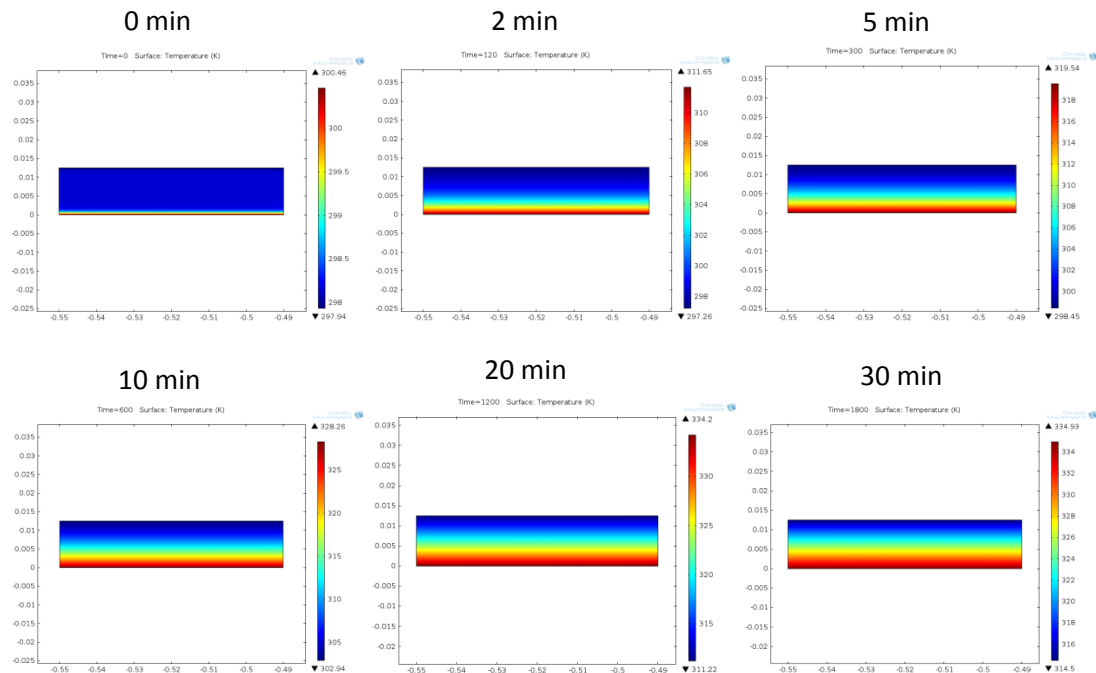


Figura 5.6. Distribución espacial de temperatura en los primeros 30 min de secado RW de un trozo de zapallo

Durante la mayor parte del secado incluyendo la etapa de calentamiento (primeros 30 minutos aprox.) la tasa de evaporación es significativa lo cual se puede observar en la Figura 5.7. Nótese que la capa de muy baja concentración (azul) siempre está ubicada en la región

superior de la muestra, frontera por donde se asumió que hay intercambio de humedad con el ambiente exterior bajo un mecanismo difusivo unidimensional. También se puede observar que la tasa de secado es relativamente baja durante los primeros 30 min porque el calor se está utilizando para calentar la muestra, pero aumenta hacia la primera hora y luego se mantiene casi constante durante las siguientes 4 h (la concentración baja desde 798 mol/cm³ hasta 27 mol/cm³ en la región inferior), después de 5 h el cambio es mínimo.

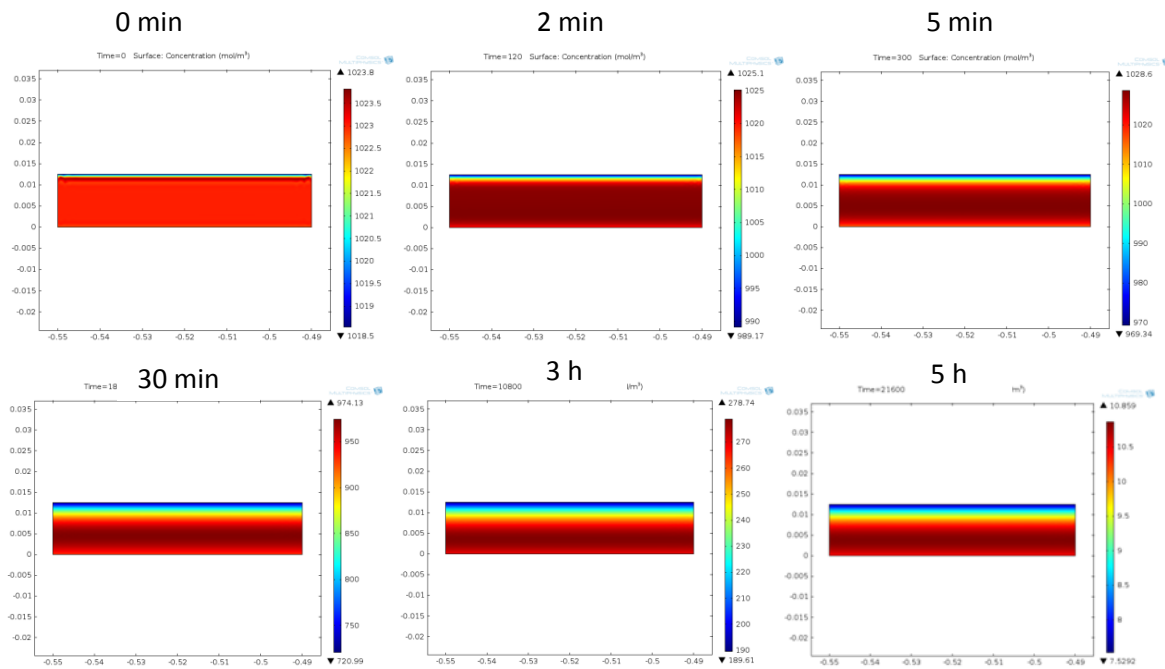


Figura 5.7. Distribución espacial del contenido de humedad durante 5 h de secado RW de un trozo de zapallo

5.5 VALIDACIÓN COMPLEMENTARIA

Como complemento de la validación de los resultados se hizo una comparación de la contribución relativa de los flujos por conducción y radiación desde el agua caliente al material alimenticio. Se ha mencionado que durante el secado RW, la energía térmica del agua caliente se transmite a través de la lámina de Mylar™ (o cualquier otra membrana de plástico) a través de conducción y radiación (Nindo y Tang, 2007). Sin embargo, no hay

datos en sí, con las contribuciones relativas de los flujos por conducción y radiación. La Figura 5.8 compara las magnitudes relativas de flujo por conducción y radiación simuladas en la superficie inferior de la muestra para una temperatura del agua del baño de 90 °C. Como se ve, el flujo conductivo es muy alto durante las etapas iniciales del proceso de secado y es el principal contribuyente para el rápido aumento de la temperatura de la muestra. El rápido establecimiento de la temperatura en la muestra permite menor gasto de energía durante el calentamiento además de un secado suave y continuo.

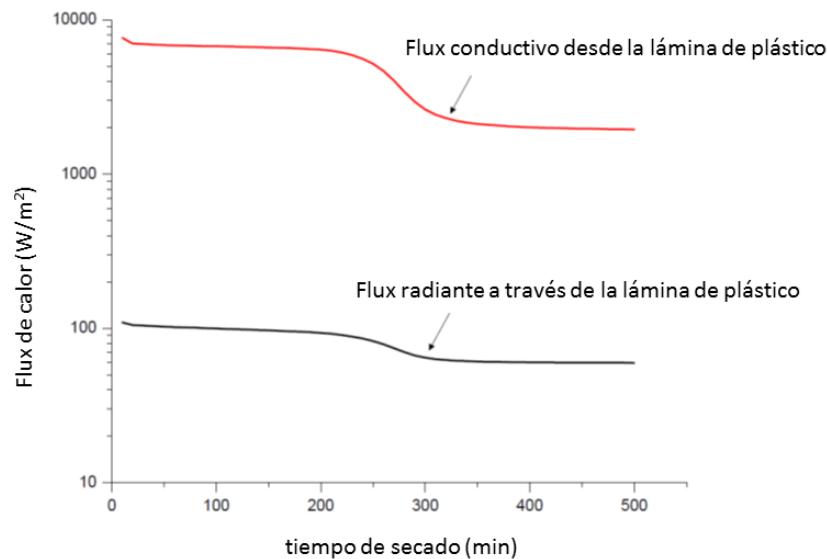


Figura 5.8. Comparación del flux de calor conductivo y radiante durante el secado RW

El flujo de radiación, sin embargo, es de aproximadamente 100 veces menor en orden de magnitud que el flujo de conducción inicial y contribuye con una cantidad muy pequeña de aumento en la temperatura durante el período inicial del proceso de secado. Además, para toda la duración del proceso, el flujo radiante permanece mucho menor que el flujo de conducción. A medida que avanza el secado, hay disminución del flujo tanto por conducción y radiación debido al aumento en la temperatura del producto. El flujo conductivo domina sobre el flujo de radiación y es responsable de la elevación de temperatura en la muestra. La Figura 5.9 compara la variación temporal de la temperatura en la superficie de la muestra con y sin efectos de la radiación. Desde un punto de vista práctico, se observó una diferencia

insignificante entre las dos curvas. Los efectos de la radiación son realmente pequeños y no contribuyen de manera significativa en el proceso de secado RW.

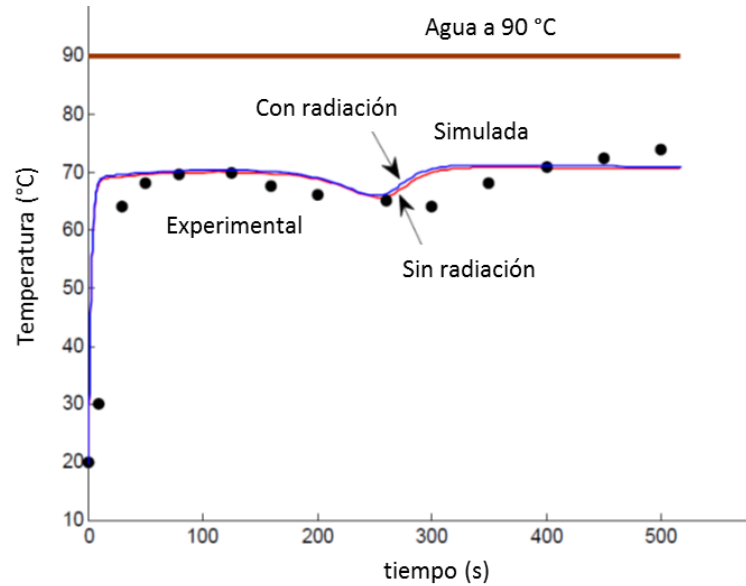


Figura 5.9. Comparación de la distribución de la temperatura con y sin efectos de radiación

5.6 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El modelado preciso de un proceso térmico de alimentos o materiales biológicos es complejo pero por simplificación y ahorro de tiempo de cómputo es necesario hacer algunas suposiciones. La mayoría de las hipótesis provienen de la geometría, del calor en la superficie, los coeficientes de transferencia de masa, cambios en las propiedades y en el volumen de los materiales durante el proceso (Datta y Rakesh, 2010). Además debe decidirse si utilizar un modelo acoplado de transferencia de masa y calor o de transferencia de calor y flujo de fluidos (Wan y Sun, 2003). Es así que un análisis de sensibilidad puede hacer justicia en la aceptabilidad de un supuesto en el modelado. En el presente estudio se analizó el efecto de importantes parámetros sobre las variables de salida. En particular, se consideraron cambios en el coeficiente de transferencia de masa k_c , que condujeron a pequeñas variaciones en el contenido de humedad, lo cual se puede observar en la Figura 5.2. Adicionalmente, al promover variaciones en el flux de calor en la superficie del alimento q_0 , se indujeron grandes

cambios en el perfil de temperatura como se describió en la sección 5.4.4. La similitud entre los resultados simulados y los experimentales dan validez a las suposiciones enunciadas en el planteamiento del modelo ante los cambios realizados en los parámetros ya mencionados.

5.7 RESUMEN DE CAPÍTULO

El uso de herramientas de simulación tipo CFD proporciona adaptabilidad de un sistema específico a grandes aplicaciones y permite el desarrollo de modelos de alta precisión. En particular, el modelo propuesto permite predecir la curva de humedad, la variación global y local en el tiempo de la temperatura dentro de un trozo de zapallo y las distribuciones espaciales de temperatura y humedad durante el secado. Los resultados establecidos por simulación numérica estuvieron acordes con los experimentales.

6. RESULTADOS

- ❖ La falta de concordancia entre las propiedades ópticas disponibles para el Mylar™ ponen en discusión la conveniencia de usar este material en el secado RW. En principio, el material funciona para alcanzar el objetivo aunque limitadamente.
- ❖ El tipo de convección (forzada o natural) afecta significativamente el desarrollo del secado RW de muestras sólidas y gruesas de alimentos. Las tasas de eliminación de humedad con convección forzada son elevadas en comparación con convección natural. Con el primer tipo se alcanzan contenidos de humedad de 2.4% (bh) mientras que con el segundo se alcanzan 76.1% después de 5 h de secado.
- ❖ El hidrosecado conductivo es una técnica semejante al secado RW y en lugar de una lámina de plástico transparente a la radiación IR se puede utilizar una placa (o membrana) que conduce calor. De igual forma, por un lado se mantiene la placa en contacto con el agua caliente y por el otro con el material a secar.
- ❖ La obstrucción del paso de la radiación infrarroja cubriendo el Mylar™ con un material que refleja la radiación como el papel aluminio, permite mejor aprovechamiento del calor proveniente del agua. En otras palabras, esta forma de secado es energéticamente más eficiente por presentar eficiencias cercanas al 72% en comparación con el 32% que produce el secado RW.
- ❖ La medición de la energía radiante en muestras delgadas confirmó la teoría del secado RW. Hay secado parcial por radiación IR gracias a la ventana de refractancia. Sin embargo, el flujo de calor radiante en muestras gruesas es insignificante comparado con el flujo de calor conductivo.
- ❖ La comparación de los dos métodos: secado RW (con Mylar™) y hidrosecado conductivo (con Mylar™/papel aluminio) definió los fenómenos de transferencia

gobernantes. El secado RW es principalmente un método conductivo, el aporte de la radiación IR es baja y la transferencia de masa está determinada por la transferencia de calor.

- ❖ Cualquier “lámina transparente” puede servir como membrana de secado según la teoría del secado RW, pero según las mediciones de radiación global no cualquiera es la más apropiada si no provee las mejores características de calidad del producto final.
- ❖ La radiación absorbida y transmitida (refractada) por las muestras durante el secado RW es mayor en las muestras secadas sobre LDPE que en las secadas sobre Mylar™.
- ❖ El sistema RW se puede modelar de una forma simple si se asemeja a un secador de contacto directo y se considera un modelo agrupado.
- ❖ Se desarrolló un modelo teórico-físico unidimensional para estudiar la transferencia de masa y calor dentro de un trozo rectangular de zapallo durante el secado RW basado en las ecuaciones gobernantes de la ley de Fourier y la segunda Ley de Fick.
- ❖ El modelo propuesto es capaz de predecir las tendencias de contenido de humedad y temperatura local de muestras gruesas de zapallo con una exactitud razonable para una temperatura del baño de agua de 90°C.
- ❖ El uso de herramientas de simulación tipo CFD proporciona adaptabilidad de un sistema específico y permite el desarrollo de modelos de apreciable precisión.
- ❖ La concordancia máxima diferencia de la solución predicha y los datos experimentales fue menor de 10%. Esto indica que las suposiciones consideradas para el modelo son válidas.
- ❖ Se encontró que ambas superficies inferior y superior del trozo de zapallo participan

en la evaporación.

- ❖ La formación de espacios con aire bajo las muestras durante el secado RW es una importante consideración en el modelo porque determina la velocidad de eliminación de la humedad hacia la superficie.
- ❖ El modelo es altamente sensible a variaciones en la interfase MylarTM-alimento. Cambios en el flux de calor aplicado en la superficie inferior de la muestra desarrolla importantes variaciones en el perfil de temperatura. Además, considerar un coeficiente de transferencia de masa en la parte inferior de la muestra por la presencia de una capa de aire, genera cambios en la curva de humedad.
- ❖ Pequeñas consideraciones de cambios de fase según el modelado en medio poroso contribuyó al desarrollo de un modelo matemático más robusto y realista.
- ❖ El modelo resultante es apropiado para simular el secado RW de cualquier producto alimenticio en láminas gruesas siempre que se conozcan parámetros de configuración inicial tales como propiedades del material y de transferencia de masa y calor.
- ❖ La similitud entre ciertas combinaciones de técnicas de secado por radiación IR o microondas con técnicas de secado convectivo fue hallada como resultado del análisis de los perfiles de temperatura en la superficie de las muestras.
- ❖ No se conocen estudios previos con conclusiones similares a las encontradas en el presente trabajo por eso no fue posible su comparación.

7. CONCLUSIONES

- ❖ Se propuso una nueva técnica semejante al secado RW denominada “hidrosecado conductivo” (HSC) el cual en lugar de una lámina de plástico transparente a la radiación utiliza una placa (o membrana) opaca que conduce el calor proveniente del agua caliente.
- ❖ La inhibición de la radiación térmica como resultado de la modificación del equipo RW, elimina la posibilidad de una ventana de refractancia dando lugar a una nueva forma de secado por conducción.
- ❖ Se comprobó por medición de radiación global que la teoría de ventana de refractancia es válida para muestras delgadas siendo el mecanismo de calor por radiación el que gobierna el secado. Para muestras gruesas, se encontró que la conducción es el modo que gobierna la transferencia de calor durante el secado RW mientras que la radiación térmica contribuye sólo con cerca del 1% de la transferencia del calor total.
- ❖ Se obtuvo un modelo basado en la física para estudiar la transferencia de masa y calor unidimensional en un trozo rectangular de un alimento durante el secado RW capaz de predecir los perfiles del contenido de humedad y temperatura local con una precisión razonable.
- ❖ El uso de la herramienta computacional COMSOL Multiphysics para dar solución al modelo matemático propuesto fue apropiado por su versatilidad y agilidad en la obtención de resultados confiables.
- ❖ Es mejor hidrosecar conductivamente muestras gruesas de alimentos porque es energéticamente más eficiente que con el mismo secado RW.

- ❖ La similitud entre los resultados simulados y los experimentales confirmaron la validez de las suposiciones enunciadas en el modelo. Los cambios en el coeficiente de transferencia de masa k_c , condujeron a pequeñas variaciones en el contenido de humedad, y las variaciones en el flux de calor en la superficie inferior del alimento q_0 , indujeron grandes cambios en el perfil de temperatura.
- ❖ La técnica de secado RW para muestras de alimentos de bajo espesor es eficiente por la presencia de calor radiante que agiliza el secado. Para muestras gruesas su desempeño se compara con otras formas de secado conductivo.

8. RECOMENDACIONES

- ❖ Se recomienda continuar el trabajo de validación del modelo para verificar precisión en diferentes espesores de muestra y varias temperaturas del baño.
- ❖ La evidente presencia de espacios ocupados por aire bajo las muestras, producto de su deformación durante el secado, es un tema que se debe profundizar e incluirlo en el modelo actual, ya que el modelo es sensible a la resistencia que ofrece el aire en la superficie inferior del material.
- ❖ Ampliar el modelo actual a un problema conjugado de medio poroso que incluya la Ley de Darcy para predecir el flujo capilar de las muestras es un reto que queda por resolver.
- ❖ Expresar una función continua según las contribuciones de calor por radiación IR en cada pico de absorción para mejorar el ajuste de los perfiles de temperatura.
- ❖ Es recomendable en estudios posteriores incluir los efectos de encogimiento, deformación y flexión en el modelo para hacerlo más preciso y confiable.

REFERENCIAS

- Abchir, F., Vasseur, J., & Trystram, G. (1988). Modelisation and simulation of drum drying. *Sixth International Drying Symposium. IDS '88*, (págs. 5-8). Versailles, Italy.
- Abonyi, B. I., Feng, H., Tang, J., Edwards, C. G., Chew, B. P., Mattinson, D. S., & Fellman, J. K. (2001). Quality retention in strawberry and carrot purees dried with Refractance Window™ system. *Journal of Food Science*, 67(3), 1051–1056.
- Abonyi, B. I., Tang, J., & Edwards, C. G. (30 de December de 1999). *Evaluation of Energy Efficiency and Quality Retention for the Refractance Window™ Drying System. Research Report*. Recuperado el January de 2008, de <<http://www.docstoc.com/docs/2913708/Draft-Report-on-the-Refractance-WindowTM>>.
- Abul-Fadl, M. M., & Ghanem, T. H. (2011). Effect of Refractance Window (RW) drying method on quality criteria of produced tomato powders as compared to the convection drying method. *World Applied Sciences Journal*, 15(7), 953-965.
- Adamov, D. B., & Savinich, V. S. (1979). Temperature dependence of polymer film emissivity. *Translated from Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal*, 37(2), 285-288.
- Akpinar, K. E. (2006). Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits. *Journal of Food Engineering*, 73, 75–84.
- Almeida, M., Torrance, K. E., & Datta, A. K. (2006). Measurement of optical properties of foods in near- and mid-infrared radiation. *International Journal of Food Properties*, 9, 651–664.
- AOAC. (1980). Official Methods of Analysis, 13th ed. *Association of the Official Agricultural Chemists*. Washington, DC.
- Aversa, M., Curcio, S., Calabro, V., & Iorio, G. (2007). An analysis of the transport phenomena occurring during food drying process. *Journal of Food Engineering*, 78, 922-932.
- Aversa, M., Curcio, S., Calabrò, V., & Iorio, G. (2010). Transport phenomena modeling during drying of shrinking materials. *20th European Symposium on Computer Aided Process Engineering-ESCAPE20* (pág. 6 pps). Pierucci S. & B. Ferraris (Eds.).

- Awogbemi, O., & Ogunleye, I. O. (2009). Effects of drying on the qualities of some selected vegetables. *IACSIT International Journal of Engineering and Technology*, 1(5), 409-414.
- Barati, E., & Esfahani, J. A. (2011). Mathematical modeling of convective drying: Lumped temperature and spatially distributed moisture in slab. *Energy*, 36, 2294-2301.
- Bird, R. B., Stewart, W. E., & Lightfoot, E. N. (1964). *Fenómenos de Transporte*. Barcelona: Ed. Reverté.
- Bolland, K. M. (2000). A new low temperature/short time drying process. *Cereal Foods World*, 45, 293-296.
- Brennan, J. G. (2006). Evaporation and Dehydration. En J. Brennan, *Food Processing Handbook* (págs. 85-121). Weinheim, Germany: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.
- Cadwallader, K. R., Moore, J. J., Zhang, Z., & Schmidt, S. J. (21 de April de 2010). Flavor Encapsulation and Flavor Release. *Comparison of spray drying and Refractance Window™ drying technologies for the encapsulation of orange oil*.
- Cano, C., & Viveros, J. G. (2010). *Secado de naranja y guayaba empleando la tecnología de ventana de refractancia*. Trabajo de grado , Universidad del Valle, Escuela de Ingeniería de Alimentos, Cali, Colombia.
- Capariño, O. A., Tang, J., Nindo, C. I., Sablani, S. S., Powers, J. R., & Fellman, J. K. (2012). Effect of drying methods on the physical properties and microstructures of mango (Philippine ‘Carabao’ var.) powder. *Journal of Food Engineering*, 111, 135–148.
- Castilho-Garcia, C., Mauro, M. A., & Kimura, M. (2007). Kinetics of osmotic dehydration and air-drying of pumpkins (*Cucubita moschata*). *Journal of Food Engineering*, 82, 284–291.
- Chou, S. K., & Chua, K. J. (2001). New hybrid drying technologies for heat sensitive food stuffs. *Trends in Food Science and Technology*, 12, 359–369.
- Chua, K. J., Chou, S. K., Mujumdar, A. S., Ho, J. C., & Hon, C. K. (2004). Radiant-convective drying of osmotic treated agro-products: effect on drying kinetics and product quality. *Food Control*, 15 , 145–158.

- Clarke, P. (2004). Refractance Window TM – “Down Under”. *Proceedings of the 14th International Drying Symposium.*, vol. B, págs. 813-820. 22-25 August, Sao Paulo, Brazil.
- Curcio, S., Aversa, M., Calabrò, V., & Iorio, G. (2008). Simulation of food drying: FEM analysis and experimental validation. *Journal of Food Engineering*, 87, 541-553.
- Datta, A. K. (2002). Conduction Heat Transfer: Unsteady State (Chap 5). En A. K. Datta, *Biological and Bioenvironmental Heat and Mass Transfer*. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Datta, A. K. (2007). Porous media approaches to studying simultaneous heat and mass transfer in food processes. II: Property data and representative results. *Journal of Food Engineering*, 80, 96-110.
- Datta, A. K., & Ni, H. (2002). Infrared and hot-air-assisted microwave heating of foods for control of surface moisture. *Journal of Food Engineering*, 51, 355-364.
- Datta, A., & Rakesh, V. (2010). *An Introduction to Modeling of Transport Process. Applications to Biomedical Systems*. New York: Cambridge University Press.
- de Escalada Pla, M., Ponceb, N., Stortzb, C., Gerschensona, L., & Rojas, A. (2007). Composition and functional properties of enriched fiber products obtained from pumpkin (*Cucurbita moschata* Duchesne ex Poiret). , , 1176–1185. *LWT*, 40.
- Dongfeng, W., Zhuoyan, H., Kai, Y., Shanshan, C., & Xiaolin, Y. (1994-2012). *China Academic Journal Electronic Publishing House*. Obtenido de <http://www.cnki.net>
- Doymaz, I. (2007). The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices. *Journal of Food Engineering*, 79, 243–248.
- Dupont Teijin Films. (s.f.).
http://usa.dupontteijinfilms.com/informationcenter/downloads/Optical_Properties.pdf.
- Fedha, M., Mwasaru, M., Njoroge, C. K., Ojijo, N., & Ouma, G. O. (2010). Effect of drying on selected proximate composition of fresh and processed fruits and seeds of two pumpkin species. *Agriculture and Biology Journal of North America*, 1(6), 1299-1302.
- Fonseca Caetano, V., Vinhas, G., Pimentel, M. F., & Ugulino de Araújo, M. C. (2013). Prediction of Mechanical Properties of Poly(ethylene terephthalate) Using Infrared Spectroscopy and Multivariate Calibration. *J. Appl. Polym. Sci.*, 3441-3446.

- Gaviria, L., & Robles, K. (2013). *Secado de zapallo (Cucurbita moschata) mediante la técnica de Ventana de Refractancia (VR™)*. Trabajo de grado, Universidad del Valle-Escuela de Ingeniería de Alimentos, Cali, Valle.
- Geankoplis, C. J. (2007). *Procesos de transporte y principios de procesos de separación, 4a ed.* México: Grupo Editorial Patria.
- Ghanem, T. H. (2010). Modeling of refractance window film dryer for liquids. *Misr J. Ag. Eng.*, 27 (2), 676 – 687.
- Guiné, R. P., Pinho, S., & Barroca, M. (2011). Study of the convective drying of pumpkin (*Cucurbita maxima*). *Food and Bioproducts Processing*, 89, 422–428.
- Halder, A., & Datta, A. K. (2012). Surface heat and mass transfer coefficients for multiphase porous media transport models with rapid evaporation. *Food and Bioproducts Processing*, 90, 475–490.
- Halder, A., Dhall, A., & Datta, A. K. (2011). Modeling transport in porous media with phase change: Applications to food processing. *Journal of Heat Transfer*, 133, 031010-1 - 031010-13.
- Harrick, N. J. (1971). Determination of Refractive Index and Film Thickness from Interference Fringes. *Applied Optics*, 10(10), 2344 - 2349.
- Hebbar, H. U., Vishwanathan, K. H., & Ramesh, M. N. (2004). Development of combined infrared and hot air dryer for vegetables. *Journal of Food Engineering*, 65, 557–563.
- Hernández, J. A., Pavón, G., & García, M. A. (2000). Analytical solution of mass transfer equation considering shrinkage for modeling food–drying kinetics. *Journal of Food Engineering*, 45, 1-10.
- Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (1999). *Fundamentos de Transferencia de Calor, cuarta edición.* Mexico: PRENTICE HALL.
- Jacobo-Valenzuela, N., Maróstica-Junior, M., Zazueta-Morales, J., & Gallegos-Infante, J. (2011). Physicochemical, technological properties, and health-benefits of *Cucurbita moschata* Duchense vs. Cehualca. A Review. *Food Research International*, 44, 2587–2593.
- Jones, K. (2006). *Dehydration of food combinations.* US Patent No. 20060112584 A1.

- Kaspar, K. L., Park, J. S., Mathison, B. D., Brown, C. R., Massimino, S., & Chew, B. P. (2012). Processing of pigmented-flesh potatoes (*Solanum tuberosum* L.) on the retention of bioactive compounds. *International Journal of Food Science and Technology*, 47, 376–382.
- Kaya, A., Aydın, O., & Dincer, I. (2006). Numerical modeling of heat and mass transfer during forced convection drying of rectangular moist objects. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49, 3094–3103.
- Kaya, A., Aydın, O., & Dincer, I. (2008). Experimental and numerical investigation of heat and mass transfer during drying of Hayward kiwi fruits (*Actinidia Deliciosa* Planch). *Journal of Food Engineering*, 88, 323–330.
- Konopacka, D., Seroczynska, A., Korzeniewska, A., Jesionkowska, K., Niemirowicz-Szczytt, K., & Plochanski, W. (2010). Studies on the usefulness of *Cucurbita maxima* for the production of ready-to-eat dried vegetable snacks with a high carotenoid content. *LWT- Food Science and Technology*, 43, 302–309.
- Konovalov, V. I., Gatapova, N. Z., & Kudra, T. (2002). Drying of liquid dispersions—unified approach to kinetics and modeling. *Proceedings of the 13th International Drying Symposium, vol. A*, págs. 218–225.
- Konovalov, V. I., Gatapova, N. Z., & Kudra, T. (2003). Drying of liquid dispersions— A unified approach to kinetics and modeling. *Drying Technology*, 21, 1029–1047.
- Konovalov, V. I., Gatapova, N. Z., Koliuch, A. N., Pachomov, A. N., Shikunov, A. N., & Utrobin, A. N. (2004). Kinetics of Conductive Drying and Heat Transfer on Contact Cylinders. *Proceedings of the 14th International Drying Symposium, IDS*. Sao Paulo, Brazil.
- Kostoglou, M., & Karapantsios, T. D. (2003). On the thermal inertia of the wall of a drum dryer under a cyclic steady state operation. *Journal of Food Engineering*, 60, 453–462.
- Kozempel, M. F., Sullivan, J. F., Craig Jr, J. C., & Heiland, W. K. (1986). Drum drying potato flakes - A predictive model. *LEBENSMITTEL - WISSENSCHAFT + TECHNOLOGIE*, 19(3), 193–197.
- Krimm, S. (1960). Infrared Spectra of High Polymers. *Fortschr. Hochpolym.-Forsch.*, 2, 51–172.

- Krishnamurthy, K., Khurana, H. K., Jun, S., Irudayaraj, J., & Demirci, A. (2008). Infrared Heating in Food Processing: An Overview. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 7, 2-13.
- Labrie, D., Booth, I. J., Thewalt, M. L., & Clayman, B. P. (1986). Use of polypropylene film for infrared cryogenic windows. *Applied Optics*, 25(2), 171-172.
- Luikov, A. V. (1975). Systems of differential equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies (review). *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 18(1-A), 1-13.
- Magoon, R. E. (1986). *Method and Apparatus for Drying Fruit Pulp and the Like*. US Patent No. 4,631,837.
- Mason, R. B. (1933). Thermal insulation with aluminum foil. *Industrial and Engineering Chemistry*, 25(3), 245-255.
- Mejía, A. L. (2011). *Efecto de la deshidratación por radiación infrarroja sobre algunas características fisicoquímicas de interés comercial del aloe vera (Aloe barbadensis)*. Trabajo de grado de Maestría, Universidad de la Sabana, Programa de Maestría en Diseño y Gestión de Procesos, Bogotá, Colombia.
- Michailidis, P. A., Krokida, M. K., & Rahman, S. (2009). Data and models of density, shrinkage, and porosity (Chap. 14). In S. Rahman, *Food Properties Handbook, Second Edition* (pp. 418-490). Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group, LLC.
- Molelectron Detector, Inc. (1 de Abril de 1993). Manual de operación PM5200.
- Molina Filho, L., Goncalves, A. K., Mauro, M. A., & Frascarelli, E. C. (2011). Moisture sorption isotherms of fresh and blanched pumpkin (*Cucurbita moschata*). *Ciênc. Tecnol. Aliment.*, 31(3), 714-722.
- Mujumdar, A. S. (1995). *Handbook of industrial drying*. New York: Marcel Dekker Inc.
- Nawirska, A., Figiel, A., Kucharska, A., Sokół-Łetowska, A., & Biesiada, A. (2009). Drying kinetics and quality parameters of pumpkin slices dehydrated using different methods. *Journal of Food Engineering*, 94, 14-20.
- Nayak, B., Berrios, J. J., Powers, J. R., Tang, J., & Ji, Y. (2011). COLORED POTATOES (*SOLANUM TUBEROSUM* L.) DRIED FOR ANTIOXIDANT-RICH VALUE-ADDED FOODS. *Journal of Food Processing and Preservation*, 35, 571-580.

- Nesvadba, P. (2005). Thermal properties of unfrozen foods (Chap. 4). In M. Rao, S. Rizvi, & A. Datta, *Engineering properties of foods, Third Edition*. Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group, LLC.
- Ni, H., Datta, A. K., & Torrance, K. E. (1999). Moisture transport in intensive microwave heating of biomaterials: a multiphase porous media model . *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42 , 1501-1512.
- Nindo, C. I., & Tang, J. (2007). Refractance Window dehydration technology: a novel contact drying method. *Drying Technology*, 25 (1), 37–48.
- Nindo, C. I., Feng, H., Shen, G. Q., Tang, J., & Kang, D. H. (2003a). Energy utilization and microbial reduction in a new film drying system. *Journal of Food Processing and Preservation*, 27(2), 117–136.
- Nindo, C. I., Powers, J. R., & Tang, J. (2007). Influence of Refractance Window evaporation on quality of juices from small fruits. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie*, 40, 1000–1007.
- Nindo, C. I., Sun, T., Wang, S. W., Tang, J., & Powers, J. R. (2003b). Evaluation of drying technologies for retention of physical quality and antioxidants in asparagus (*Asparagus officinalis*, L.). *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie*, 36, 507–516.
- Nindo, C. I., Tang, J., Cakir, E., & Powers, J. R. (2006). Potential of Refractance Window Technology for Value Added Processing of Fruits and Vegetables in Developing Countries. *ASABE Annual International Meeting Sponsored*. Portland, Oregon.
- Nindo, C. I., Tang, J., Powers, J. R., & Bolland, K. (2004). Energy consumption during Refractance Window evaporation of selected berry juices. *International Journal of Energy Research*, 28, 1089–1100.
- Ochoa-Martínez, C. I., Quintero, P. T., Ayala, A. A., & Ortiz, M. J. (2012). Drying characteristics of mango slices using the Refractance Window™ technique. *Journal of Food Engineering*, 109, 69–75.
- Ocoró-Zamora, M. U., & Ayala-Aponte, A. A. (2013). Influence of thickness on the drying of papaya puree (*Carica papaya* L.) through Refractance Window TM technology. *Revista DYNA*, 80(182), 147-154.
- Oromiehie, A., & Meldrum, I. G. (1999). Characterization of Polyethylene Terephthalate and Functionalized Polypropylene Blends by Different Methods. *Iranian Polymer Journal*, 8(3), 193-204.

- Pan, Z., & Atungulu, G. G. (2011). *Infrared heating for food and agricultural processing*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Pavan, M. A., Schmidt, S. J., & Feng, H. (2012). Water sorption behavior and thermal analysis of freeze-dried, Refractance Window-dried and hot-air dried açai (*Euterpe oleracea* Martius) juice. *LWT - Food Science and Technology*, 48, 75-81.
- Pavón-Melendez, G., Hernández, J. A., Salgado, M. A., & García, M. A. (2002). Dimensionless analysis of the simultaneous heat and mass transfer in food drying. *Journal of Food Engineering*, 51, 347-353.
- Pellerin, C., Rousseau, M. ..., Prudhomme, R. E., & Pe'Zolet, M. (2002). Orientation and Relaxation in Thick Poly(ethylene terephthalate) Films by Transmission Infrared Linear Dichroism. *Applied Spectroscopy*, 56(1), 17- 23.
- Quintero, P. (2009). *Evaluación del método de hidrosecado en secado de mango Tommy*. Trabajo de grado , Universidad del Valle, Escuela de Ingeniería Química, Cali, Colombia.
- Raisul Islam, M., Thaker, K. S., & Mujumdar, A. S. (2007). A Diffusion Model for a Drum Dryer Subjected to Conduction, Convection, and Radiant Heat Input. *Drying Technology*, 25, 1043–1053.
- Ratti, C., & Mujumdar, A. S. (1995). Infrared Drying. En A. Mujumdar, *Handbook of Industrial Drying* (Vol. 1, págs. 1–39). New York: Ed. Marcel Dekker.
- Ruiz-Lopez, I. I., Cordova, A., Rodriguez-Jimenes, G. C., & García-Alvarado, M. A. (2004). Moisture and temperature evolution during food drying: effect of variable properties. *Journal of Food Engineering*, 63 , 117–124.
- Sablani, S. S., Rahman, M. S., Datta, A. K., & Mujumdar, A. S. (2007). *Handbook of Food and Bioprocess Modeling Techniques*. Boca Raton, FL: Taylor and Francis Group, LLC.
- Salagnac, P., Glouannec, P., & Lecharpentier, D. (2004). Numerical modeling of heat and mass transfer in porous medium during combined hot air, infrared and microwaves drying. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, 4479–4489.
- Sandu, C. (1986). Infrared radiative drying in food engineering: A process analysis. *Biotechnology Progress*, 2, 109–119.
- Siegel, R., & Howell, J. (2002). *Thermal Radiation Heat Transfer* (4th ed.). New York: Taylor & Francis.

- Singh, P., Erdogdu, F., & Rahman, S. (2009). Specific heat and enthalpy of foods (Chap. 16). In S. Rahman, *Food Properties Handbook, Second Edition* (pp. 517-541). Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group, LLC.
- Sojak, M., & Głowacki, S. (2010). Analysis of giant pumpkin (*Cucurbita maxima*) drying kinetics in various technologies of convective drying. *Journal of Food Engineering*, 99, 323–329.
- Sun, L., Raisul Islam, M., Ho, J. C., & Mujumdar, A. S. (2005). A diffusion model for drying of a heat sensitive solid under multiple heat input modes. *Bioresource Technology*, 96, 1551-1560.
- Swasdisevi, T., Devahastin, S., Sa-Adchom, P., & Soponronnarit, S. (2009). Mathematical modeling of combined far-infrared and vacuum drying banana slice. *Journal of Food Engineering*, 92, 100–106.
- Topuz, A., Dincer, C., Özdemir, K. S., Feng, H., & Kushad, M. (2011). Influence of different drying methods on carotenoids and capsaicinoids of paprika (Cv., Jalapeno). *Food Chemistry*, 129, 860–865.
- Topuz, A., Feng, H., & Kushad, M. (2009). The effect of drying method and storage on color characteristics of paprika. *LWT - Food Science and Technology*, 42, 1667–1673.
- Trystram, G., & Vasseur, J. (1992). The modeling and simulation of a drum drying process. *International Chemical Engineering*, 32, 689-704.
- Tsilingiris, P. T. (2003). Comparative evaluation of the infrared transmission of polymer films. *Energy Conversion and Management*, 44, 2839–2856.
- Vafai, K. (2000). *Handbook of porous media*. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Vallejo, J. (2010). *Secado de pitahaya amarilla (Var. Hylocereus Selenicereus) mediante la técnica de hidrosecado y osmo-hidrosecado* . Trabajo de grado, Universidad del Valle, Escuela de Ingeniería Química, Cali, Colombia.
- Vega-mercado, H., Góngora-Nieto, M. M., & Barbosa-Cánovas, G. V. (2001). Advances in dehydration of foods. *Journal of Food Engineering*, 49, 271-289.
- Villa-Corrales, L., Flores-Prieto, J. J., Xamán-Villaseñor, J. P., & García-Hernández, E. (2010). Numerical and experimental analysis of heat and moisture transfer during drying of Ataulfo mango. *Journal of Food Engineering*, 98, 198–206.

- Wang, L., & Sun, D. W. (2003). Recent developments in numerical modelling of heating and cooling processes in the food industry-a review. *Trends in Food Science & Technology*, 14 , 408–423.
- Wang, N., & Brennan, J. G. (1995). A Mathematical Model of Simoultaneous Heat and Moisture Transfer during Drying of Potato. *Journal of Food Engineering*, 24, 47-60.
- Welti-Chanes, J., Vélez-Ruiz, J. F., & Barbosa-Canovas, G. V. (2003). *Transport phenomena in food processing*. Boca Ratón, FL.: CRC Press.
- Wu, A. C., & McNeely, G. W. (2003). *US Patent Patent No. 6,503,586 B1*.